17 Vibroakustische Messtechnik

17.1 Einsatzbereiche

17.1.1 Technisches Umfeld

Vibroakustische Messsysteme werden im Automobilversuch nahezu während des gesamten Entwicklungsprozesses eingesetzt. Da kaum ein Bauteil des Fahrzeugs ohne Bedeutung für das vibroakustische Verhalten ist, betreffen die messtechnischen Untersuchungen im Prinzip alle Komponenten des Fahrzeugs, von der Karosserie über den Motor und das Fahrwerk bis zum Interieur.

Ein wesentlicher Aspekt beim Einsatz von Messtechnik ist der reproduzierbare Betrieb des Prüflings selbst. Daher finden viele Untersuchungen an Prüfständen statt, auf denen sich die Prüflinge in einer praxisrelevanten Art betreiben lassen. Für Messungen am Gesamtfahrzeug werden hauptsächlich Rollenprüfstände genutzt, die als Schwingungsprüfstand, als reflexionsarmer Akustik-Prüfstand oder als Akustik-Windkanal ausgeführt sein können. Daneben kommen auch Flachbahn-Prüfstände zum Einsatz, die beispielsweise fahrdynamische Situationen wie Kurvenfahrten simulieren können. Untersuchungen an Motoren, Getrieben und Aggregaten werden an Komponentenprüfständen durchgeführt, die als Hallraum, u.a. für Schallleistungsmessungen, als reflexionsarmer Raum oder als halbreflexionsarmer Raum mit schallhartem Boden ausgeführt sind (Kapitel 16). Die Prüfstände sind in der Regel mit mindestens einer elektrischen Antriebseinheit ausgestattet, welche den Prüfling betriebsgerecht belasten oder schleppen kann. Typische Betriebszyklen an den Prüfständen sind Drehzahlhochläufe bei definierter Last, feste Betriebspunkte mit definierter Drehzahl und Last oder Laststeigerungen bei festen Drehzahlstufen. Neben den Untersuchungen auf den verschiedenen Prüfständen werden auch Straßenmessungen mit Prototypen durchgeführt, um das Gesamtfahrzeug im kundenrelevanten Fahrbetrieb bewerten zu können.

Die vibroakustische Messtechnik hat sich in den letzten Jahrzehnten rasant entwickelt und dabei mehrere konzeptionelle Schritte gemacht. Die Vielkanaltechnik etablierte sich zunächst an den Prüfständen und erlaubte dort die parallele Verarbeitung zahlreicher Messgrößen wie z.B. Schalldrücke, Beschleunigungen, Kräfte, Winkeländerungen oder Drehzahlen. Gleichzeitig entstanden kleine transportable Messsysteme mit Akku-Versorgung, die sich mobil einsetzen ließen. Die Abgrenzung zwischen stationären und mobilen Systemen ist mittlerweile jedoch kaum noch vorhanden. Die Hersteller bieten vielmehr modulare Hardware-Plattformen an, die auch bei vielkanaligen Konfigurationen noch transportabel sind. Bei der Erfassung der Quellsignale mit diversen Sensoren (Kapitel 17.2) werden üblicherweise auch die Ohrpositionen der Insassen und Betriebsdaten der Fahrzeugsteuerung mitgemessen. Moderne Messsysteme lassen sich einfach in das Fahrzeug installieren und unterstützen die Ein-Mann-Bedienung.

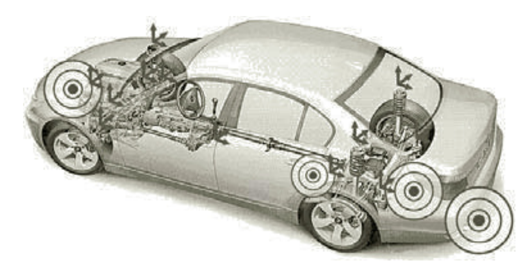


Bild 17-1: Typische Anregungspunkte für Luft- und Körperschall im Fahrzeug. Bild: BMW Group

Die steigende Vielfalt an Messgrößen wird unter dem Oberbegriff „dynamische Daten“ zusammengefasst. Durch die gleichzeitige Erfassung digitaler Daten können die dynamischen Messdaten ergänzt werden. So erlaubt beispielsweise die Nutzung des CAN-Bus-Signals (Controller Area Network) den detaillierten Einblick in Steuer- und Regelvorgänge sowie in interne Systemgrößen von Fahrzeug und Motor. Des Weiteren lässt sich der CAN-Bus auch für die Anbindung eines Messsystems an den Prüfstand nutzen, wodurch ein effizienter Datenaustausch möglich wird. Für höhere Anforderungen in Bezug auf Echtzeitfähigkeit und Datenbandbreite steht neuerdings der FlexRay™-Bus zur Verfügung.

Das Aufgabengebiet der Vibroakustik ist in der Versuchspraxis eng mit anderen Fahrzeugfunktionen vernetzt. Dies gilt sowohl für die betrachteten Komponenten und Systeme, als auch für die erfassten und analysierten dynamischen Daten. Daher sind eine über diese Aufgabengebiete hinweg einsetzbare Messtechnik und/oder eine durchgängige Datenbasis gefordert. Beispielsweise nutzt die Verbrennungsapplikation von Motoren ebenfalls Messgrößen wie die Druckindizierung der Zylinder und die hochauflösende Winkelmessung des Kurbeltriebs, die auch für die akustische Optimierung relevant sind. Eine typische Anwendung liegt hier in der Parametrierung der Verbrennungskennfelder von Dieselmotoren. Dabei wird die Verbrennungsdiagnostik mit den Optimierungsgrößen Leistung, Verbrauch und Abgas durch Messgrößen für die Geräuschqualität, wie beispielsweise die Dieselhaftigkeit, ergänzt [1]. In der Fahrdynamik ist die Agilität eines Fahrzeugs als Reaktion

auf die Bedienhandlungen des Fahrers eng mit der Vertikaldynamik und damit mit dem akustischen und schwingungstechnischen Fahrkomfort verknüpft. In beiden Disziplinen werden auch äquivalente dynamische Größen erfasst und analysiert. Zur subjektiv empfundenen Agilität gehört dabei die akustische Wahrnehmung (Kapitel 8.2).

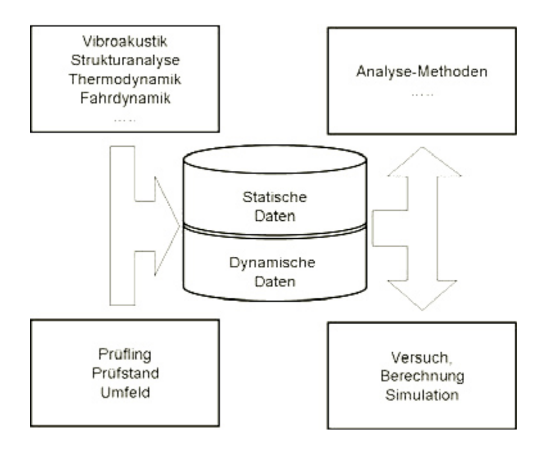


Bild 17-2: Integrativer Ansatz für Datenerfassung und Datenaustausch

Modular und flexibel konfigurierbare Messsysteme erlauben es heute, dass Arbeitsplätze für unterschiedliche Aufgaben im Rahmen von Datenerfassung, Qualitätskontrolle und Analyse dasselbe Messsystem nutzen. Andererseits ist die Weiterentwicklung der Messtechnik auch verbunden mit einer steigenden Anzahl an messtechnischen Speziallösungen, welche der Anwender je nach Aufgabenstellung für seinen Prozess kombinieren möchte. Insofern besitzt ein standardisiertes oder verlustarm konvertierbares Datenformat aus Sicht des Anwenders eine höhere Bedeutung, als der Plattformgedanke einzelner Anbieter von Messtechnik [2]. Dies gilt insbesondere auch in Bezug auf die Anbindung von Berechnungs- und Simulationswerkzeugen. Während in der Vergangenheit die Konvertierung von Messdaten in ein anderes Format gängige Praxis war, welche erheblichen Aufwand für die Konvertierung und die nochmalige Ablage der Massendaten im jeweils neuen Zielformat erforderte, stützt sich das zukünftige Vorgehen auf ein Datenablage-Format, welches einen effizienten, systemunabhängigen Austausch von Mess-, Berechnungs- und Beschreibungsdaten erlaubt. Zu diesem Zweck wurde von einem herstellerunabhängigen Arbeitskreis die Definition des standardisierten Datenformates ASAM/ODS [3] vorangetrieben, welches bereits in diversen Anwendungen erfolgreich genutzt wird.

Um aus der Fülle der erfassten Messdaten effizient die richtigen Versuchsaussagen ableiten zu können, besteht darüber hinaus der Bedarf an einer möglichst aussagefähigen Auswertung und grafischen Aufbereitung der Messdaten sowie an einer gut geordneten Datenablage. Die Nutzung der Daten von verschiedenen Messsystemen und Anwendern mit unterschiedlichen Aufgaben macht insbesondere auch die hinreichend integrierte Dokumentation der Messungen hinsichtlich des Prüfaufbaus, des Prüflings und des Prüfablaufs erforderlich. Nur so lassen sich interessierende Messungen in Datenbanken recherchieren und alle relevanten Messbedingungen auch bei älteren Datensätzen zurückverfolgen.

17.1.2 Messabläufe

Am Anfang der Neuentwicklung eines Fahrzeugs oder einer seiner Komponenten stehen die Festlegungen des Entwicklungs-Lastenhefts. Welche Kriterien dort aufgenommen und mit welchen konkreten Zahlenwerten oder sonstigen Zielvorgaben diese hinterlegt werden, hängt in aller Regel von den Eigenschaften des Vorgängermodells, der Wettbewerbssituation und den umzusetzenden Anforderungen ab.

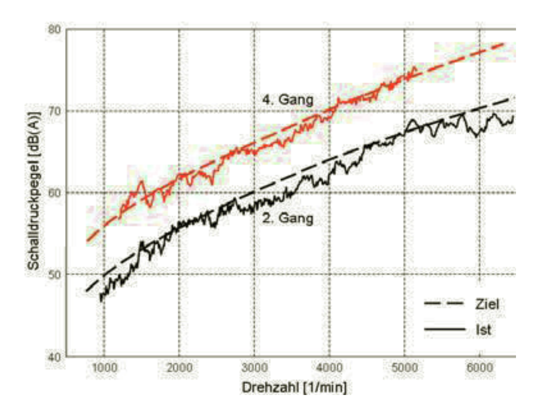


Bild 17-3: Gesamtpegel im Fahrzeug-Innenraum bei langsamer Beschleunigung (Ziel und Ist), als Beispiel für ein Entwicklungskriterium

In Lastenheften sind neben quantitativen Zielwerten oft nur subjektive Anforderungen an die Geräuschwahrnehmung formuliert, ohne sie mit konkreten Messgrößen und Zahlenwerten zu hinterlegen. Ein typisches Beispiel ist die Forderung nach dem „harmonischen Verlauf" eines Geräusches. Die vibroakustische Entwicklung hat in diesem Fall die Aufgabe, mit Analysegrößen arbeiten zu müssen, die für die Freigabe nicht unmittelbar herangezogen werden können. Beim Test von Prototypen zeigen sich jedoch auch unerwartete Phänomene, die im Lastenheft nicht verankert sind, dennoch die Kundentauglichkeit des Fahrzeugs tangieren und deshalb verfolgt werden müssen.

Bei der Untersuchung vibroakustischer Phänomene sind der Aufbau des Prüflings und die möglichst exakte Reproduktion des Prüflingsbetriebs von wesentli-

cher Bedeutung. Beispielsweise verschieben abweichende Rohrlängen zwischen Motor und Ladeluftkühler bei Prüfstands- oder Fahrzeugaufbauten die Resonanzfrequenzen des Ansaugsystems. Ein im Fahrzeug auffälliges Brummen ist ohne die identisch aufgebaute Luftführung am Prüfstand nicht leicht zu reproduzieren. Auch können automatische Eingriffe der Motorsteuerung den Vergleich von Messreihen unmöglich machen. So schließt zum Beispiel bei Dieselmotoren eine Schutzschaltung gegen Versottung (Absetzung unerwünschter Flüssigkeiten) häufig das Abgasrückführventil bei zu langem Leerlaufbetrieb. Für vergleichbare Messungen des Leerlaufgeräuschs müssen daher auch identische Betriebszustände sichergestellt werden. Eine große Hilfe ist in diesem Zusammenhang der Datenstrom des CAN-Busses. Damit lassen sich Messungen von Straße, Rollen- und Motorenprüfstand hinsichtlich des identischen Prüflingsbetriebs im Detail nachprüfen. Darüber hinaus können auf der Straße gemessene Fahrprofile anhand des CAN-Bus-Signals auf Prüfständen nachgefahren werden.

Angesichts der breit gefächerten Versuchsumfänge in der Fahrzeugentwicklung ist die Abfolge einer Messung mit Datenerfassung, Datenablage und Analyse immer in einem größeren Kontext zu sehen. Die Querverbindungen zwischen Messungen und Analysen an Bauteilen, Aggregaten, Triebsträngen oder ganzen Fahrzeugen sind nicht nur Voraussetzung für die Bewertung der Relevanz einzelner Phänomene und die Zielerreichung gemäß Lastenheft, sondern auch entscheidend für die Effizienz im Entwicklungsprozess.

Direkt bewerten lassen sich nur Analyseergebnisse, deren Zahlenwerte sich unmittelbar mit Lastenheftwerten vergleichen lassen. Je nach Anforderung muss dazu die geeignete Analysemethode ausgewählt werden, die analog zum Versuchsaufbau und Prüflingsbetrieb dem jeweiligen vibroakustischen Phänomen angepasst ist. Wichtig ist die Interpretation der jeweiligen Einzelanalyse im zugehörigen Kontext. Ein isoliert betrachtetes Geräusch kann bisweilen sehr unangenehm klingen, eingebettet in einen Gesamtklang aber völlig unauffällig sein. Umgekehrt kann ein Geräusch trotz niedriger Pegel sehr störend wirken. Letztlich ist deshalb immer die subjektive Bewertung der Fahrzeuggeräusche entscheidend. Diese wird im Entwicklungsprozess durch die Audio-Wiedergabe der Zeitrohdaten von Messungen sowie durch Möglichkeiten der Filterung unterstützt. Auch die Simulation und Auralisierung von Alternativszenarien durch Synthese kann dabei hilfreich sein (Kapitel 17.5).

Auf Basis der abgesicherten Analyse und Bewertung eines Entwicklungsstands können Maßnahmen der Weiterentwicklung festgelegt werden. Diese reichen von konstruktiven Änderungen an Komponenten über Applikationsänderungen bis zur Definition neuer Mess- und Prüfverfahren. Mit der Konstruktion des nächsten Prototypen schließt sich die Entwicklungsschleife und der nächste Durchlauf beginnt. Dabei wird der Entwicklungsschwerpunkt durch „Frontloading" zunehmend in die frühen Entwicklungsphasen verlagert (Kapitel 2.1).

17.2 Vibroakustische Sensoren

Ein vibroakustisches Messsystem besteht aus drei wesentlichen Komponenten [4]:

- Messaufnehmer (Sensor)
- Messwerk (Mess-Frontend)
- Rechner mit Software für Analysen und Auswertungen sowie zur Darstellung und für das Reporting

Der Sensor ist das erste Glied in der Messkette. Er hat die Aufgabe, die verschiedenen mechanischen und akustischen Messsignale so in eine elektrische Größe umzusetzen, dass diese im nachfolgenden Messwerk weiterverarbeitet werden kann. Der ideale Sensor erfüllt dabei folgende Bedingungen:

- Er beeinflusst das Messsignal nicht (Rückwirkungsfreiheit).
- Sein Dynamikumfang ist größer als derjenige des zu erwartenden Signals.
- Er ist unempfindlich gegen Umgebungseinflüsse wie Temperatur- oder Luftdruckschwankungen.
- Der Sensor hat ein gutes Preis-Leistungs-Verhältnis und eine lange Lebensdauer.

Da sich mit einem einzigen Sensortyp nicht alle Vorgaben gleichzeitig erfüllen lassen, ist es notwendig, je nach Aufgabenstellung verschiedene Sensoren flexibel einsetzen zu können. Dabei ist abzuwägen, welche Bedingungen für die jeweilige Messsituation Priorität haben [5].

Sensortyp	Messgröße	SI-Einheit	Kapitel
Messmikrofon	Schalldruck	Pa	17.2.2
Intensitätssonde	Schallintensität	W/m²	16.2.1
Kunstkopf	Schalldruck	Pa	16.1
Mikrofon-Array	Schalldruck	Pa	16.2.3
Hitzdraht-Anemometer	Schallschnelle	m/s	
Beschleunigungsaufnehmer	Schwingbeschleunigung	m/s²	17.2.1
Laservibrometer	Oberflächenschnelle	m/s	17.2.3
Dehnungsmessstreifen	Dehnung	µm/m	

Tabelle 17-1: Ausgewählte vibroakustische Sensoren

17.2.1 Beschleunigungssensor

Beschleunigungsaufnehmer haben die Aufgabe, zeitvariable oder Schwingbeschleunigungen aufzunehmen. Ihr Aufbau hängt von der Wirkungsweise bei der mechanisch-elektrischen Wandlung ab. Die meisten Beschleunigungsaufnehmer arbeiten nach dem piezoelektrischen Prinzip. Sie bestehen aus einer Grundplatte, an der eine oder mehrere seismische Massen über ein oder mehrere Piezoelemente befestigt sind. Anzahl und Anordnung der Massen hängen vom Konstruktionsprinzip ab. Häufig wird nach folgenden Typen unterschieden:

- Biegeanregung (KB-Typen),
- Kompressionsanregung (KD-Typen),
- Scheranregung (KS-Typen).

Entsprechend Newtons zweitem Gesetz

$$F = m \cdot a$$

ist die Kraft F bei konstanter Masse m direkt proportional zur Beschleunigung a. Die seismische Masse im Sensor erzeugt somit bei Beschleunigung eine Kraftwirkung auf das piezoelektrische Material, welche in diesem wiederum eine proportionale Ladungsverschiebung zur Folge hat. Diese wird über einen Ladungsverstärker in eine Spannung umgewandelt, die damit ebenfalls zur Beschleunigung proportional ist.

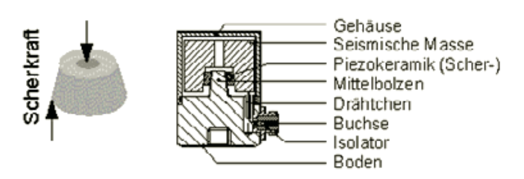


Bild 17-4: Prinzipdarstellung für einen Sensor mit Scherkraftanregung

Die seismische Masse bildet zusammen mit dem elastischen Piezoelement ein Feder-Masse-System. Ein solches System weist Tiefpassverhalten mit einem linearen Frequenzbereich und einer Resonanzüberhöhung auf. Um die Resonanzfrequenz nach oben zu verschieben, muss die seismische Masse möglichst klein werden, was allerdings auf Kosten der Empfindlichkeit geht.

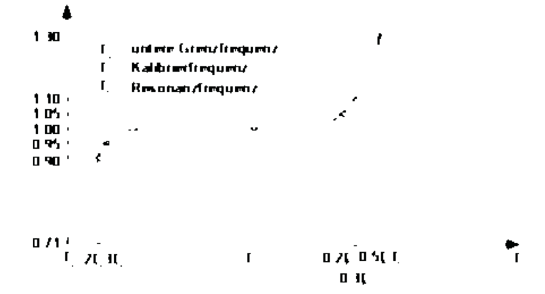


Bild 17-5: Frequenzgang eines Beschleunigungsaufnehmers

Ein maßgeblicher Faktor für zuverlässige Messungen ist die korrekte Anbringung des Aufnehmers an der zu untersuchenden Struktur. Typische Fehlerursachen sind:

- unebene Kontaktfläche (Radius),
- raue Kontaktfläche,
- Nachgiebigkeit der Kontaktfläche (Blech oder Kunststoffverkleidung),
- zu hohe Masse des Sensors (diese soll höchstens 1/10 der Masse des Objektes betragen),
- Fehlausrichtung der Sensorachse und der zu messenden Richtung.

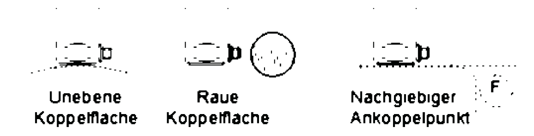


Bild 17-6: Fehlermöglichkeiten bei der Befestigung eines Beschleunigungsaufnehmers

Die gewählte Befestigungsart des Sensors auf dem Objekt hat einen deutlichen Einfluss auf den nutzbaren Frequenzbereich. Empfohlen wird die Befestigung mit einer Stiftschraube, gegebenenfalls über einen Isolierflansch. Sehr gebräuchlich ist auch die Klebebefestigung (u. a. mit Sekundenkleber, Epoxydharz oder Bienenwachs). Ein Haftmagnet lässt sich einfach anbringen; für schnelle Diagnosen wird oft eine Tastspitze eingesetzt [6].

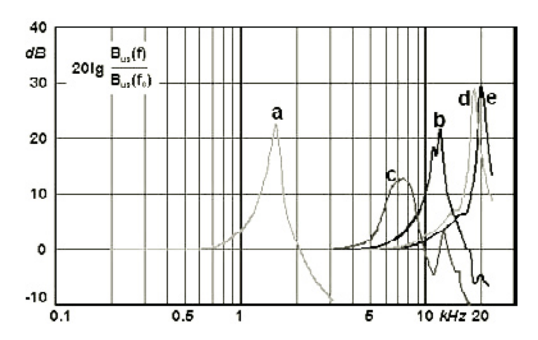


Bild 17-7: Lage der Resonanzfrequenzen einiger gebräuchlicher Befestigungsarten [6]
a: Tastspitze
b: Isolierflansch
c: Haftmagnet
d: Klebebefestigung
e: Stiftschraube

Problematisch bei allen Ladungsaufnehmern sind lange Verbindungskabel, da sie Ladungsverluste verursachen und damit die Empfindlichkeit beeinträchtigen. Außerdem können schwingende Leitungen selbst störende Ladungen induzieren, was ebenfalls zur Verfälschung des Messsignals führt. Deshalb müssen verlustarme Spezialkabel eingesetzt werden. Diese Probleme umgehen Beschleunigungsaufnehmer mit integriertem Ladungsverstärker (IEPE, Integrated Electronic Piezo Electric). Sie erlauben einfache Verbindungskabel und große Entfernungen zum Mess-Frontend, haben aber nur eine eingeschränkte Dynamik und sind wegen der integrierten Elektronik im Normalfall nur bis ca. 120 °C einsetzbar. Zur Versorgung des Verstärkers benötigen sie von der Signalkonditionierungseinheit einen Konstantstrom von mindestens 4 mA. Die Vor- und Nachteile der beiden Sensortypen „IEPE“ und „Ladung“ sind daher für den jeweiligen Einsatzfall abzuwägen. Der Vorteil des Beschleunigungsaufnehmers mit integriertem Vestärker ist der niederohmige Ausgang, der große Kabellängen erlaubt und ohne Spezialkabel auskommt. Mögliche Nachteile sind die benötigte Konstantstromspeisung, die Rauschquelle durch die integrierte Elektronik und der begrenzte Temperaturbereich. Dementsprechend gilt für den Ladungsaufnehmer als vorteilhaft, dass er keine Stromversorgung benötigt, ein geringes Eigenrauschen aufweist und eine deutlich höhere Dynamik hat. Nachteilig sind die erforderlichen Spezialkabel und die möglichst kurz zu haltenden Leitungen.

17.2.2 Messmikrofon

Ein Messmikrofon hat die Aufgabe, Luftschall in ein elektrisches Signal umzusetzen. Dazu wird das Prinzip eines druckempfindlichen Kondensators eingesetzt. Eine bewegliche Membran und die feste Gegenelektrode bilden den Kondensator. Die Änderung des Membranabstandes durch eine auftreffende Schallwelle führt zu einer Kapazitätsänderung. Um diese auszuwerten, wird die Kapsel über einen sehr hochohmigen Widerstand mit einer Polarisationsspannung von $U_V = 200$ V aufgeladen. Kapazitätsänderungen ΔC im Rhythmus des Schallsignals haben dann entsprechende Spannungsänderungen ΔU zur Folge:

$$\Delta U = U_V \frac{\Delta C}{C}$$

Durch den direkt folgenden Impedanzwandler wird diese Spannung über einen niederohmigen Ausgang an das Frontend weitergegeben. Bei vorpolarisierten Mikrofonkapseln besteht die Gegenelektrode aus einem Elektret, in das eine Ladung „eingefroren“ ist. Dadurch entfällt die Polarisationsspannung von 200 V. Mit vorpolarisierten Kapseln sind auch Impedanzwandler nach dem ICP®-Prinzip möglich. Messmikrofone bestehen aus einer Kapsel, die der Kapazität entspricht, und einem Impedanzwandler, auch Vorverstärker genannt. Mikrofonkapsel und Impedanzwandler bilden eine Einheit. Während ICP®-Mikrofone mit ihrer vereinfachten Kabelführung einfach anzuschließen sind, benötigen Mikrofone mit 200 V Versorgungsspannung häufig sehr hochwertige Signalketten aus Kapsel und Impedanzwandler, die ein äußerst niedriges Eigenrauschen aufweisen. Daraus resultiert eine unübertroffene Signaldynamik einhergehend mit einem sehr geringen Eigenrauschen für diesen Mikrofontyp. Für den Anschluss von Messmikrofonen an ein Frontend hat sich der 7-polige Lemostecker durchgesetzt. Die Belegung der Kontakte kann sich jedoch von Hersteller zu Hersteller unterscheiden [5].

Messmikrofone sind im Aufbau eine feinmechanische Herausforderung. Der Abstand zwischen Membran und Gegenelektrode beträgt im Schnitt nur 20 µm, wobei eine Toleranz von +/– 0,8 µm einzuhalten ist. Die Dicke der Membran variiert in Abhängigkeit vom Mikrofontyp zwischen 1,5 und 8,0 µm. Die Toleranz beträgt max. 10 % der nominalen Dicke.

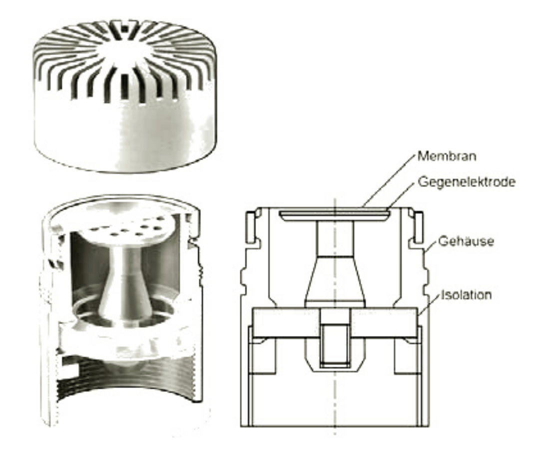


Bild 17-8: Aufbau einer Mikrofonkapsel 1/2″ [7]

Typ	Empfindlichkeit [mV/Pa]	Maximaler Schalldruckpegel [dB]	Frequenzbereich [Hz]
1″	50	146	2,6 ... 18k
1/2″	50	146	4 ... 100k
1/4″	5	168	4 ... 100k

Tabelle 17-2: Technische Daten von Kondensator-Mikrofonkapseln [8]

In der Messtechnik trifft man meistens ½″-Kapseln (Durchmesser 12,8 mm) an. Messmikrofone haben

eine kugelförmige Richtcharakteristik, solange die Wellenlänge größer ist als der Durchmesser der Mikrofonkapsel **(Bild 17-9)**. Je nach Anwendungsfall ist der Frequenzgang, die Dynamik und das Rauschverhalten des eingesetzten Mikrofons zu beachten. Der Frequenzbereich reicht deutlich über den hörbaren Bereich von 20 bis 20.000 Hz hinaus. Da die untere Grenzfrequenz bei 3 Hz liegen kann, können niederfrequente Luftdruckschwankungen aus einer Klimaanlage, Luftströmungen oder eine plötzlich geöffnete Tür das Messergebnis verfälschen. Deshalb haben Signalkonditionierungen für Messmikrofone häufig ein schaltbares Hochpassfilter bei 22,4 Hz. Alle Mikrofone sind empfindlich gegen Luftanströmungen. Deshalb ist zum Beispiel im Windkanal oder im Nahfeld eines luftgekühlten Generators ein Windschirm erforderlich.

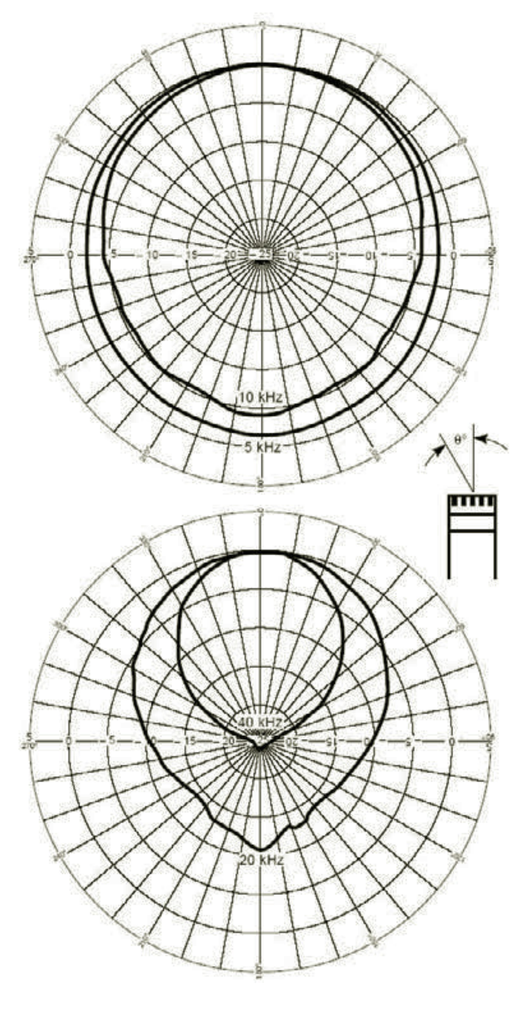


Bild 17-9: Richtcharakteristik einer ½″ Kapsel, bezogen auf den Schalleinfall bei 0° [7]

Zur Kalibrierung von Mikrofonen wird ein Pistonfon oder ein Schalldruck-Kalibrator verwendet. Beide stellen in einer Druckkammer einen exakten Schalldruckpegel bei einer definierten Frequenz bereit. Im hochgenauen Pistonfon wird der Wechseldruck durch einen Kolben mit mechanisch definiertem Hub erzeugt. Im preisgünstigeren Schalldruck-Kalibrator übernimmt dies ein geregelter Lautsprecher.

Für einige Aufgabenstellungen werden spezielle Mikrofonanordnungen eingesetzt [9]:

- Intensitätsmessung mit zwei speziell aufeinander abgestimmten Mikrofonkapseln für hohe Phasentreue bei tiefen Frequenzen (Kapitel 16.2.1)
- Kunstkopf-Messtechnik zur Aufzeichnung kopfbezogener Signale für die gehörgerechte Wiedergabe über Kopfhörer (Kapitel 16.1)
- Mikrofonarrays für die Schallortung (Kapitel 16.2.3)

17.2.3 Laservibrometer

Wenn bei einer Messung an einer leichten Struktur ein herkömmlicher Beschleunigungsaufnehmer durch seine Masse das Ergebnis verfälschen würde oder an einer schwer zugänglichen Stelle gemessen werden muss, bieten sich optische Messverfahren an. Laservibrometer nutzen das Prinzip der Laserinterferometrie und können berührungslos Schwingungsmessungen an einem Objekt durchführen.

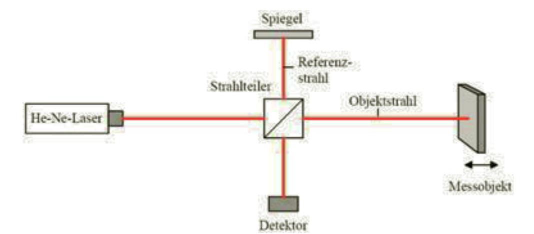


Bild 17-10: Prinzip des Michelson-Interferometers [10]

Lichtquelle ist ein He-Ne-Laser, der kohärentes Licht mit einer Wellenlänge λ = 632 nm im sichtbaren Bereich aussendet. Der Laserstrahl wird von dem Strahlteiler in zwei Teilstrahlen zerlegt. Der Objektstrahl trifft auf die mit der Geschwindigkeit v bewegte Oberfläche des Messobjektes und wird von dort reflektiert. Die Frequenz f_O des reflektierten Objektstrahls besitzt aufgrund des Doppler-Effektes eine gegenüber der Frequenz f_R des Referenzstrahls geringfügig verschobene Frequenz:

$$f_O = f_R \sqrt{\frac{c+v}{c-v}} \approx f_R \frac{1+v}{c}$$

Der reflektierte Strahl passiert erneut den Strahlteiler und interferiert mit dem Referenzstrahl, der an einem Spiegel reflektiert wurde. Immer dann, wenn das Messobjekt sich um die halbe Lichtwellenlänge des He-Ne-Lasers ($\lambda = 316$ nm) bewegt, durchläuft die Intensität der interferierenden Strahlen einen Hell-Dunkel-Zyklus. Die Änderung der Intensität wird mit einem lichtempfindlichen Detektor erfasst und in ein elektrisches Signal umgewandelt. Die Frequenz Δf dieser Hell-Dunkel-Zyklen ist proportional zur Geschwindigkeit v des Messobjekts:

$$\Delta f = \frac{2 \cdot v}{\lambda}$$

Laservibrometer sind ein typisches Beispiel für ein spezielles Messgerät, das sich einfach in ein vielkanaliges Messsystem einbinden lassen muss. Die Verbindung erfolgt über einen analogen Ausgang des Laservibrometers, der ein der Messgröße proportionales Spannungssignal in das Messsystem einspeist. Die Kalibrierung kann wie bei einem Beschleunigungssensor erfolgen, indem der Laserstrahl auf einen Schwingungskalibrator gerichtet wird. Die Oberflächenschnelle des Schwingungskalibrators wird im Messsystem der SI-Einheit m/s zugeordnet. Aus der Schwinggeschwindigkeit lässt sich durch Differenziation die Schwingbeschleunigung berechnen und durch Integration der Schwingweg. Eine typische Anwendung für ein Laservibrometer ist die berührungsfreie Schwingungsmessung am Ventiltrieb [10].

17.3 Signalverarbeitung

17.3.1 Kalibrierung

Damit die Messsignale von den Sensoren im Messwerk korrekt weiterverarbeitet werden, muss die Messkette kalibriert sein. Häufig wird in diesem Zusammenhang auch der Begriff der Eichung verwendet. Allerdings bezieht sich die Eichung im korrekten Sinn nur auf Sensoren und Messgeräte, die aufgrund ihrer Verwendung der gesetzlichen Eichpflicht unterliegen und bei denen die Kalibrierung von anerkannten Institutionen durchgeführt wird. Zur Kalibrierung wird der Sensor durch ein Kalibrier-Normal angeregt, das die Messgröße des Sensors in einer bekannten Stärke gemäß den ISO-Einheiten erzeugt. Zwischen den vorgeschriebenen Kalibrierintervallen muss der Anwender die Kalibrierung nur noch vor der Messung prüfen und gegebenenfalls nachjustieren. Je nach Sensortyp, typischer Signaldrift und Genauigkeitsanforderung kann er auch vor jeder Messung selbst eine vollständige Kalibrierung durchführen. Bei einem Beschleunigungsaufnehmer wird dazu üblicherweise ein Schwingungskalibrator genutzt, der als kleines Handgerät ausgeführt ist. Als definierte Translationsbewegung gibt der Schwingungskalibrator ein Testsignal von beispielsweise 10 m/s^2 bei 159,2 Hz (1000 Hz/2π) ab. Das Ausgangssignal des Sensors wird im Messgerät der bekannten Signalstärke des Schwingungskalibrators zugeordnet. Anschließende Messsignale referenziert das Messgerät auf die beim Kalibrieren ermittelten Bezugswerte.

Die beschriebene Methode der Kalibrierung setzt lineares Verhalten sowohl des Frequenzgangs als auch bezüglich des Signalpegels voraus. Beschleunigungssensoren der oben beschriebenen Bauarten erfüllen diese Kriterien in ihrem Arbeitsbereich. Manche Sensortypen für bestimmte dynamische Messgrößen haben ein nichtlineares Frequenzverhalten, das durch eine erweiterte Kalibrierung mit einer Frequenzgang-Korrektur kompensiert werden muss. Ein typisches Beispiel ist das Hitzdraht-Anemometer zur Messung der Schallschnelle [11]. Des Weiteren kann auch ein nichtlineares Übertragungsverhalten bezüglich der Signaldynamik wie zum Beispiel bei bestimmten Temperatursensoren auftreten. Zur Kompensation der Nichtlinearität der Ausgangsspannung eignet sich in diesem Fall eine Polynom-Kalibrierung. Hier wird bei bekannter Abhängigkeit des Ausgangssignals des Sensors von höheren Potenzen der Messgröße (quadratisch, kubisch usw.) im Messgerät ein kalibrierendes Polynom zur Kompensation der Nichtlinearität hinterlegt.

Vibroakustische Signale besitzen oft eine Dynamik, die mehrere Zehnerpotenzen umfasst. Deshalb wird vielfach an Stelle der SI-Einheiten von der logarithmischen Relativdarstellung als Pegel L Gebrauch gemacht. Die Skalierung erfolgt dann in Dezibel (dB) wie nachstehend am Beispiel der Beschleunigung dargestellt:

$$L = 10 \cdot \lg\left(\frac{a}{a_0}\right)^2 = 20 \cdot \lg\frac{a}{a_0}$$

Entsprechend der Norm ISO 1683 [12] werden für die Umrechnung in Dezibel folgende Referenzamplituden zugrunde gelegt:

Beschleunigung:	$a_0 = 10^{-6}$ m • s^{-2} = 1 µm • s^{-2}
Geschwindigkeit:	$v_o = 10^{-9}$ m • s^{-1} = 1 nm • s^{-1}
Schwingweg:	$s_0 = 10^{-12}$ m = 1 pm
Schalldruck:	$p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa = 20 • µPa

17.3.2 Signalkonditionierung

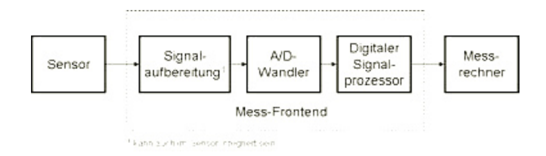


Bild 17-11: Vibroakustische Messkette

Im Mess-Frontend wird das Sensorsignal aufbereitet, digitalisiert und an den Messrechner weitergeleitet (**Bild 17-11**). Durch die Signalkonditionierung wer-

den die unterschiedlichen Sensorsignale in spannungsproportionale Signale gewandelt. Die Signalkonditionierungseinheit ist entweder als eigenständiges Gerät zwischen Sensor und Mess-Frontend geschaltet oder in dieses integriert. Die Aufgaben der Signalkonditionierungen hängen vom Sensor ab. Zum Beispiel benötigt ein Sensor mit integrierter Elektronik (IEPE) eine Konstantstromquelle von 4 mA, wobei nur zwei Leitungen benötigt werden. Hochwertige Messmikrofone ohne Vorpolarisierung hingegen benötigen für die Membran eine Vorspannung von 200 V und zusätzlich eine Versorgungsspannung für den Vorverstärker. Sie haben mehradrige Verbindungen und bieten eine hochwertige symmetrische Signalführung. Bei Dehnungsmessstreifen ist eine entsprechende Widerstandsschaltung erforderlich – je nachdem, ob sie als Voll-, Halb- oder Viertelbrücke eingesetzt werden.

Der A/D-Umsetzer setzt das wert- und zeitkontinuierliche Eingangssignal in wert- und zeitdiskrete Digitalworte um. Ein Tiefpassfilter am Eingang begrenzt die Signalbandbreite des analogen Eingangssignals zur Vermeidung von Aliasing-Fehlern. Dem Filter folgt die Abtast-/Halte-Schaltung (sample and hold), die das momentane Eingangssignal für die Dauer der Abtastung konstant hält und damit zeitlich diskretisiert (wertekontinuierlich und zeitdiskret). Die Abtastfrequenz muss mindestens doppelt so hoch sein wie die Eckfrequenz des Filters, um dem Abtasttheorem von Nyquist und Shannon zu entsprechen. In der Messtechnik hat sich der Wert 2,56 etabliert. Dieser Faktor entspricht 256/100 oder 2^8/100 und hat den Vorteil, bei einer Abtastrate von 2^n zu ganzzahligen Frequenzauflösungen zu führen.

Nach dem Halteglied befindet man sich immer noch in der analogen Signalebene, denn die Amplituden können unendlich viele Zwischenstufen annehmen, und zwar positive und negative. Der entscheidende Schritt zum Abschluss ist die Quantisierung der Amplitudenwerte (lineare Quantisierung). Sie begrenzt die unendliche Anzahl der Zwischenwerte auf ein endliches Maß. Das geschieht, indem nicht die Abtastamplitude selbst übertragen wird, sondern der Stufenmittelwert, in dessen Intervall der analoge Abtastwert liegt. Typisch sind 16-Bit- und 24-Bit-Umsetzer. In der Messtechnik haben sich interpolative Wandler (Sigma-Delta-Wandler) durchgesetzt. Sie erzielen eine hohe Genauigkeit durch eine hohe Geschwindigkeit (Überabtastung) und erreichen eine Auflösung von bis zu 24 Bit. In der Messpraxis kommt der Aussteuerungsanzeige eine wichtige Bedeutung zu. Diese Funktion sollte möglichst früh in der Signalkonditionierung integriert sein, um etwaige Übersteuerungen in den analogen Schaltkreisen eindeutig zu detektieren.

Das Eingangssignal liegt nun als digitales Wort vor. Ein digitaler Signalprozessor (DSP) im Mess-Frontend führt u. a. folgende Aufgaben aus:

- digitale Filterung mit IIR- und/oder FIR-Filtern,
- Laufzeitkorrektur zwischen unterschiedlichen Signalarten (dynamisches Signal/Tachosignal) oder zwischen gleichartigen Kanälen,
- Pegelanpassung,
- Integration/Differenziation des Eingangssignals.

In älteren Messsystemen war es noch üblich, dass die Analyseprozesse vom DSP im Frontend mit übernommen und nur Ergebnisse an den Messrechner übertragen wurden. Aufgrund der hohen Leistungsfähigkeit moderner Datenschnittstellen und Messrechner werden heutzutage meist die lückenlosen Zeitsignale zum Rechner übertragen und erst dort den unterschiedlichen Analysen unterworfen. Parallele Schnittstellen (SCSI) wurden durch serielle Schnittstellen wie FireWire, USB oder Ethernet abgelöst. Letzteres hat sich für Vielkanalsysteme durchgesetzt. Es erlaubt eine hohe Bandbreite und große Kabellängen. Neben der Datenübertragung vom Frontend zum Messrechner erfolgt über diese Schnittstelle auch die Kommunikation zwischen Messrechner und Frontend. Zum Beispiel werden parallel zur Datenerfassung auch Steuer- und Ausgabesignale (Prüfstandsparameter wie Drehzahl, Last und Anregungssignale) vom Messrechner an das Frontend für deren Ausgabe übertragen.

17.3.3 Drehzahlerfassung

Bei der Messung an rotierenden Bauteilen wie Motoren, Getriebe, Antriebsstrang oder Reifen wird die Drehzahl als notwendige Größe erfasst. So kann ein Drehzahlsignal als Führungsgröße für die verschiedenen Analysen dienen. Die Ordnungsanalyse (Kapitel 17.4.2), Drehschwingungsuntersuchungen (Kapitel 17.4.5) oder eine auf Grad-Kurbelwinkel bezogene Darstellung von Messergebnissen (Kapitel 17.4.4) sind ohne eine genaue Drehzahlinformation nicht möglich [13]. Die Qualität der Erfassung der Drehzahlpulse entscheidet über die Güte der anschließenden Analyse-Ergebnisse. Moderne Messsysteme verarbeiten zur Drehzahlerfassung ein gepulstes Signal. Aus dem Zeitabstand Δt zwischen zwei Pulsen und der Anzahl k der Pulse pro Umdrehung lässt sich die Drehzahl n ableiten. Im quasistationären Fall gilt:

$$\frac{n}{[1/\min]} = 60 / \left(k \cdot \frac{\Delta t}{[s]} \right)$$

Zur Drehzahlerfassung werden unterschiedliche Drehzahlsensoren eingesetzt. Optische Sensoren (Lasersensor, Infrarotsensor, Lichtschranke) sind sehr genau und können mehrere hundert Pulse je Umdrehung liefern. Induktive Geber (Hall-Sensor) arbeiten ebenfalls berührungslos und können auch in einer „unsauberen“ Umgebung eingesetzt werden, meistens an Zahnrädern (Anlasserzahnkranz, Nockenwelle,

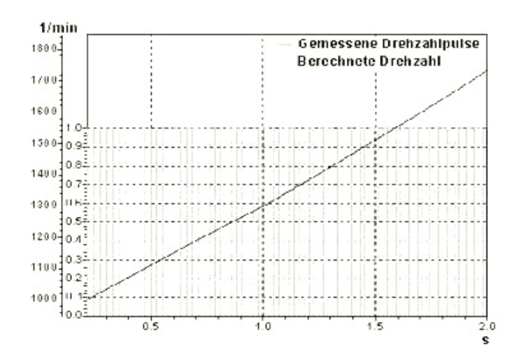


Bild 17-12: Gepulste Drehzahlerfassung

Getriebe). Vom Zündkabel lassen sich am benzingetriebenen Verbrennungsmotor mit einer Stromzange sehr einfach die Zündpulse abnehmen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass das Motormanagement in Abhängigkeit von Last und Drehzahl eine Verschiebung des Zündzeitpunktes einstellt. Eine Drehzahlerkennung aus der Lichtmaschinenspannung wird dagegen immer schwieriger, da moderne Generatoren eine Ausgangsspannung mit sehr geringer Restwelligkeit liefern.

Die Anzahl der Pulse pro Umdrehung wird vom Pulsgeber bestimmt. Gegebenenfalls kommt ein Verstärker zum Einsatz, der das Signal verstärkt, weiter aufbereitet, optional die Pulse reduziert (Teiler) oder weitere, umfassendere Signalkonditionierungen vornimmt. Bei all diesen Signalkonditionierungsschritten sind die Gruppenlaufzeiten der verschiedenen Signale zu berücksichtigen. Typisch ist ein Ausgangssignal mit TTL-Pegel. Drehzahlsignale am Motor können an verschiedenen Stellen abgegriffen werden. Üblich sind Signale von der Nockenwelle (0,5 Pulse pro Umdrehung), der Kurbelwelle (1 Puls pro Umdrehung), der Zündspule (2 Pulse pro Umdrehung beim 4-Zylinder-Motor) oder Signale von angebrachten Gebern oder einer Tachoscheibe. Drehzahlen am Rad können über den ABS-Sensor abgegriffen werden.

Die zeitliche Auflösung der Drehzahlerfassung beeinflusst maßgeblich die Qualität der nachfolgenden Analysen. Dabei gehen die maximale Drehzahl und die Anzahl der Pulse als Parameter mit ein. Bei einer angenommenen Pulsfolge von 60 Flanken pro Umdrehung und einer Drehzahl von 6.000 min^{-1} beträgt die Pulsrate 6.000 Hz. Erfolgt nun die Drehzahlerfassung über einen Tachoeingang mit der Abtastrate von 48 kHz, wie bei Digital-Audio-Eingängen üblich, kommt es bei der Drehzahlbestimmung durch den Jitter-Effekt zu einem Fehler von bis zu 12,5 %. Der Drehzahlwert schwankt also um ca. 750 min^{-1}. Eine verlässliche Ordnungsanalyse oder Drehschwingungsanalyse ist damit nicht möglich. Sind aufgrund der gewünschten Genauigkeit für digitales Resampling bei der Ordnungsanalyse oder einer Drehschwingungsanalyse für höhere Motorordnungen hohe Pulsraten notwendig, ist eine Aufbereitung und Verarbeitung mit mindestens 10 MHz Zählereingang erforderlich.

Anstelle der periodischen Auswertung akzeptieren verschiedene Messsysteme ein der Drehzahl proportionales Gleichspannungssignal oder ein frequenzanaloges Signal. Diese Verfahren eignen sich jedoch nur bedingt für eine Ordnungsanalyse. Eine Grad-Kurbelwinkel-Analyse ist in diesem Fall wegen des fehlenden Bezugs zu einem Arbeitsspiel (Trigger) nicht möglich. Auch der CAN-Bus liefert eine Drehzahlinformation, allerdings nicht als Pulsfolge, sondern als Zahlenwerte. Hier sind jedoch gewisse Abweichungen zur tatsächlichen Drehzahl infolge der Laufzeiten vorhanden.

17.3.4 Ergänzende Messgrößen

Neben den unmittelbar am Prüfling gemessenen dynamischen Größen, wie beispielsweise Luft- und Körperschallsignalen, werden in aller Regel auch ergänzende Messgrößen seitens des Prüfstands miterfasst. Dazu gehören die Bremsdrehzahl, die Motorlast sowie Abgaswerte, elektrische Lasten von Generatoren oder auch Durchflussraten und Temperaturen von Flüssigkeiten und Gasen von Motor-Kreisläufen, die je nach Aufbau über prüfstandseitige Regelkreise eingestellt werden.

Die synchrone Erfassung der Prüfstandsdaten mit den Messgrößen am Prüfling erlaubt außer der Bewertung des Prüflings auch die Überwachung der Regelgenauigkeit des Prüfstands selbst. Anhand der Messdaten lässt sich beispielsweise die Abweichung zwischen Soll- und Istwerten beim Durchfahren eines Drehzahlprofils als Analyse darstellen. Mit der Erfassung der CAN-Bus-Signale, die zur Steuerung von Motor, Fahrzeug und Prüfstand genutzt werden, sind detaillierte Analysen betriebsrelevanter Größen wie Einspritzmengen, Ladedrücke, Temperaturen oder der Stellung von Steuer- und Regelklappen möglich. Dadurch lassen sich in Frage kommende Ursachen von unklaren Geräusch- oder Schwingungsphänomenen seitens der Motor- oder Fahrzeugsteuerung besser einkreisen.

Anhand der bei einer Testfahrt auf der Straße erfassten CAN-Bus-Signale lässt sich auch ein kompletter Fahrzyklus auf einem Rollen- oder Motorenprüfstand nachfahren. Der Synchronisierung dieser Signale zu den anderen Messgrößen sind jedoch Grenzen gesetzt. Je nach Auslastung des Busses können einzelne Signale eine längere oder kürzere Verzögerung erfahren, die nicht rückverfolgbar ist. Was sich zur Beschreibung von Temperaturänderungen oder sehr langsamen Drehzahlverläufen noch nutzen lässt,

reicht für Änderungen mit höherer Dynamik nicht mehr aus. Hier eignet sich der FlexRay™-Bus, welcher in weiten Teilen der Automobilbranche als Nachfolgetechnologie des CAN-Busses gesehen wird. Dabei handelt es sich um ein echtzeitfähiges Bussystem mit deutlich höherer Datenübertragungsrate und weiteren Verbesserungen gegenüber dem CAN-Bus [14].

17.4 Analyse-Methoden

Nachdem die digitalisierten Messwerte an den Messrechner übergeben wurden, geht es in der Signalanalyse darum, aus dem Zeitsignal Informationen zu gewinnen, die das Messobjekt charakterisieren und so Versuchsaussagen erlauben. Dazu sind umfangreiche Analyse-Methoden erforderlich. Die geläufigsten sind in **Tabelle 17-3** aufgeführt und werden nachstehend exemplarisch erläutert.

Zeit-bezogene Analysen	Zeitverläufe Drehschwingungsanalysen Grad-Kurbelwinkel-Analysen
Frequenz-analysen	Digitale 1/n Oktave-Analysen (1/1, 1/3, 1/12, 1/24, 1/48) Diskrete Fourier-Transformation (DFT) Fast Fourier-Transformation (FFT) Autoleistungsspektrum (APS) Kreuzleistungsspektrum (CPS)
Kurzzeit-analysen	Wavelet-Analysen Wigner-Ville-Transformation Zeropadding
Ordnungs-analysen	Digitales Ordertracking Kalman-Filterung
Statistische Analysen	Hauptkomponentenanalyse (PCA)
Psychoakustische Analysen	Lautheit, Schärfe, Rauigkeit, Motorrauigkeit, Schwankungsstärke, Artikulationsindex, Tonhaltigkeit, Prominence Ratio, Tone to Noise Ratio

Tabelle 17-3: Typische Analysemöglichkeiten vibroakustischer Messsysteme

17.4.1 Frequenzanalysen

Vielfach bietet die Darstellung im Frequenzbereich bessere Einsichten in die Signaleigenschaften als das Zeitsignal selbst. Das Zeitsignal wird entweder durch analoge Filterung oder durch diskrete Fourier-Transformation in den Frequenzbereich überführt.

Bei der Frequenzanalyse mit Bandfiltern unterscheidet man Filter mit konstanter absoluter Bandbreite und Filter mit konstanter relativer Bandbreite. Filter mit konstanter absoluter Bandbreite werden als Schmalbandfilter eingesetzt. Nachteilig bei diesen Filtern ist die geringe Analysegeschwindigkeit, was stationäre Signale für die Analyse voraussetzt.

Bei der Filterbankanalyse mit 1/n Oktave-Filtern wird das Eingangssignal durch eine Reihe von parallel geschalteten Bandpass-Filtern geschickt, an deren Ausgang dann jeweils ein gefiltertes Zeitsignal zur Verfügung steht. Von diesem wird anschließend ein mittlerer Pegel gebildet. Die sogenannten 1/n Oktave-Filter besitzen eine konstante relative Bandbreite $\Delta f/f$. Für den Zusammenhang zwischen unterer und oberer Grenzfrequenz f_u und f_0 sowie der Bandmittenfrequenz f_m gilt:

$$f_m = \sqrt{f_u \cdot f_0}$$

Bei der Oktave-Analyse liegen untere und obere Grenzfrequenz um den Faktor 2 auseinander, bei Filtern mit 1/n Bruchteilen von Oktaven die n-te Wurzel aus 2 **(Tabelle 17-4)**. Für Oktave- und Terzfilter sind die Mittenfrequenzen in den Normblättern in DIN 45651 und DIN 45652 festgelegt **(Tabelle 17-5)**.

Filterart	F_o/f_u	f_u/f_m	f_o/f_m
1/1 Oktave	2	0,7	1,4
1/3 Oktave (Terz)	1,26	0,89	1,12
1/12 Oktave	1,0595	0,976	1,025
1/24 Oktave	1,0293	0,988	1,012
1/48 Oktave	1,0145	0,993	1,007

Tabelle 17-4: Bandbreiten von 1/n Oktave-Filtern

Ein grundlegendes Problem beim Übergang vom Zeit- in den Frequenzbereich ist die Zeit-Frequenz-Unschärfe. Das Zeit-Bandbreitenprodukt kann aufgrund der Unschärferelation nicht beliebig klein werden, so dass man sich entweder für eine hohe Zeitauflösung und damit für breitbandige Filter oder für eine hohe Frequenzauflösung mit schmalbandigen Filtern und damit für ein geringes zeitliches Auflösungsvermögen entscheiden muss. Beispielsweise beträgt die Bandbreite des niedrigsten Filters bei der Terzanalyse ca. 4,6 Hz und die damit verbundene Einschwingzeit des Filters ca. 0,8 Sekunden. Bei der 1/24 Oktave-Analyse beträgt die Bandbreite des niedrigsten Filters ca. 0,024 Hz. Seine Einschwingzeit beträgt bereits ca. 137 Sekunden. Dieses Dilemma können auch die diskrete Fourier-Transformation oder die Kurzzeit-Analysen nur bedingt auflösen.

Wird ein Rauschsignal mit konstanter spektraler Leistungsdichte und damit über der Frequenz konstantem Schmalbandpegel (Weißes Rauschen) einer 1/n Oktave-Analyse unterzogen, so steigt das Analyseergebnis mit 10 dB/Dekade an, da die Filterbandbreite mit größer werdender Frequenz zunimmt und somit mehr Leistung pro Frequenzband anfällt. Da die Bandbreite des Oktave-Filters drei Terzbandbreiten umfasst, liegen auch die mit Oktave-Filter gemessenen Werte im Mittel um 4,8 dB über denjenigen, die mit Terzfilter gemessen wurden **(Bild 17-13)**. Fällt das Leistungsspektrum umgekehrt proportional mit der Frequenz ab (Rosa Rauschen), so ergeben sich bei 1/n Oktave-Analysen konstante Werte pro Filter. Diese Beispiele zeigen, dass das Analyseergebnis stark von der verwendeten Bandfilterart abhängt und auch dementsprechend interpretiert werden muss.

Bei der digitalen Frequenzanalyse hat sich die *schnelle Fourier-Transformation* (Fast Fourier-Transformation, FFT) durchgesetzt, die mit besonders effizienten Algorithmen arbeitet. Das kontinuierliche Zeitsignal wird dazu in Zeitblöcke mit 2^n Abtastwerten zerlegt. Aus jedem Zeitblock wird dann die FFT berechnet. Damit an den Blockgrenzen keine Unstetigkeiten auftreten, wird der Zeitblock mit einer Fensterfunktion

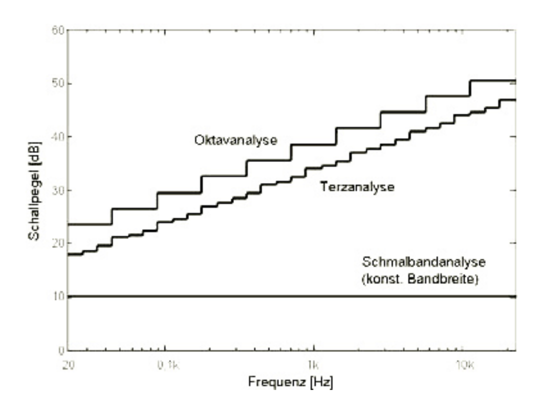


Bild 17-13: Frequenzanalyse bei weißem Rauschen und Filterung mit konstanter und relativer Bandbreite

(meist Hanning oder Flattop) gewichtet. Um eine Datenreduktion zu erreichen, können bereits bei der Messung Spektren gemittelt werden. Gegebenenfalls erfolgt die Mittelung getriggert, zum Beispiel auf den Zündzeitpunkt eines Verbrennungsmotors bezogen. Werden nur Amplituden benötigt und kann auf die Phasenbeziehungen verzichtet werden, reduziert sich die Datenmenge um die Hälfte. Zur Darstellung von Übertragungsfunktionen, Kreuzleistungsspektren und Kohärenzen sind jedoch die kompletten FFT-Daten notwendig, also Betrag und Phase oder Real- und Imaginär-Teil.

In vielen Analysatoren sind die FFT-Ergebnisse auch die Grundlage zur Bestimmung

- des Gesamtpegels durch Addition der Einzellinien und Berücksichtigung des Gewichtungsfensters als Korrekturfaktor;
- von 1/n Oktave-Analysen durch Zusammenfassen von Spektrallinien in dem jeweiligen Frequenzband (wird auch als 1/n Oktave-Synthese bezeichnet). Es ist dabei sinnvoll, am unteren Frequenzband mindestens 3 Linien pro Band zugrunde zu legen.
- von Ordnungsdaten, wenn zusätzlich ein Tachosignal miterfasst wurde (wird auch als Ordnungssynthese bezeichnet).

Das Ergebnis der spektralen Darstellung kann durch diverse Einstellungen beeinflusst werden:

- Autoleistungsspektrum (engl. Auto Power Spectrum – APS),
- Frequenzlinienabstand/Leistungsdichte (engl. Power Spectral Density – PSD),
- Bewertungsfilter für Mikrofonsignale (A-/B-/C-/D-Bewertung, Kapitel 7.1.2),
- Darstellung der y-Amplitude RMS/Spitze/Spitze-zu-Spitze.

Oktavbänder				Terzbänder			
f_m Hz	f_u Hz	f_o Hz	Δf Hz	f_m Hz	f_u Hz	f_o Hz	Δf Hz
				12,5	11.2	14	2.8
16	11.2	22.4	11.2	16	14	18	4
				20	18	22.4	4.4
				25	22.4	28	5.6
31.5	22.4	45	22.6	31.5	28	35.5	7.5
				40	35.5	45	9.5
				50	45	56	11
63	45	90	45	63	56	71	15
				80	71	90	19
				100	90	112	22
125	90	180	90	125	112	140	28
				160	140	180	40
				200	180	224	44
250	180	355	175	250	224	280	56
				315	280	355	75
				400	355	450	95
500	355	710	355	500	450	560	110
				630	560	710	150
				800	710	900	190
1000	710	1400	690	1000	900	1120	220
				1250	1120	1400	280
				1600	1400	1800	400
2000	1400	2800	1400	2000	1800	2240	440
				2500	2240	2800	560
				3150	2800	3550	750
4000	2800	5600	2800	4000	3550	4500	950
				5000	4500	5600	1100
				6300	5600	7100	1500
8000	5600	11200	5600	8000	7100	9000	1900
				10000	9000	11200	2200
				12500	11200	14000	2800
16000	11200	22400	11200	16000	14000	18000	4000
				20000	18000	22400	4400

Tabelle 17-5: Oktave- und Terz-Filter nach DIN 45651/2

Die Einstellung der FFT-Parameter entscheidet über den Frequenzlinienabstand und die zeitliche Auflösung. Eine hohe Frequenzauflösung geht zu Lasten der Erkennung von zeitlichen Strukturen und umgekehrt. Durch eine Überlappung der Zeitblöcke kann die zeitliche Varianz eines Signals besser abgebildet werden; sie wird jedoch durch das Gewichtungsfenster verschmiert. Kurzzeit-Analysemethoden wie Zeropadding, Wavelet und Wigner-Ville versuchen, gleichzeitig die Frequenz- und Zeitauflösung zu optimieren. Allerdings sind diese Verfahren mit dem Nachteil verbunden, je nach Parametrierung Pegelverschiebungen oder Messartefakte zu erzeugen.

17.4.2 Ordnungsanalysen

Zur Analyse von Schwingungen an rotierenden Systemen wird bei vielen Systemen häufig die Ordnungsanalyse aus der FFT herangezogen. Die Ordnungsanalyse durch Umrechnung der FFT wird als *Ordnungssynthese* bezeichnet. Grundsätzlich ist es möglich, aus einer FFT-Analyse Ordnungen abzuleiten. Es treten jedoch Probleme auf, sobald sich die Drehzahl ändert. Erfolgt die Drehzahländerung innerhalb eines Zeitblocks der FFT, verschmieren die Ordnungslinien, da die Ordnungen innerhalb des Zeitintervalls mehrere Frequenzlinien überstreichen. Für einen langsamen, quasistationären Hochlauf ist der Fehler meist akzeptabel. Problematisch bleibt aber der Frequenzlinienabstand, der bei veränderter Drehzahl konstant bleibt. Das bedeutet, dass bei niedriger Drehzahl die Ordnungsauflösung schlechter ist als bei hohen Drehzahlen. Bei einer angenommenen Blocklänge von 250 ms ist die Frequenzlinienbreite 4 Hz. Beträgt die Startdrehzahl zum Beispiel 1000 min^{-1}, liegt die erste Motorordnung bei 16,7 Hz. Eine Frequenzlinie von 4 Hz entspricht einer Auflösung von etwa 0,25 Ordnungen. Bei 6000 min^{-1} beträgt die Frequenz der ersten Ordnung inzwischen 100 Hz; damit entspricht eine Frequenzlinie von 4 Hz der Auflösung von 0,04 Ordnungen.

Bei der Ordnungsanalyse mit *digitalem Resampling* wird das Signal nicht in konstanten Zeitabständen erfasst, sondern jeweils entsprechend einer konstanten Winkeldifferenz. Dabei sind zwei Verfahren zu unterscheiden:

- Beim *externen Sampling* wird ein sehr hoch aufgelöstes Drehzahlsignal benötigt. Aus der Drehzahlauflösung ergibt sich der Analysebereich. Von Nachteil ist die Notwendigkeit eines analogen Mitlauffilters, das entsprechend der Drehzahl nachgeführt wird und Fragen aufwirft bezüglich der Genauigkeit, zum Beispiel des Phasengangs sowie der Veränderungsgeschwindigkeit für die Eckfrequenz.
- Bei der *zeitkonstanten Abtastung mit digitalem Resampling* wird wie bei den Standardanalysen das Nutzsignal mit der benötigten Abtastrate erfasst. Gleichzeitig werden Drehzahlpulse erfasst. Die Normierung auf die Drehzahl erfolgt durch ein digitales Resampling. Darauf basierend wird eine klassische FFT durchgeführt. Die Ordnungsauflösung bleibt in diesem Fall auch bei sich ändernder Drehzahl konstant. Die Anpassung erfolgt kontinuierlich mit jedem neuen Drehzahlpuls. Damit sind auch hochgenaue Ordnungsanalysen möglich, wie sie zum Beispiel im Getriebebau gefordert sind, um Zahneingriffsfrequenzen und deren Harmonische beurteilen zu können.

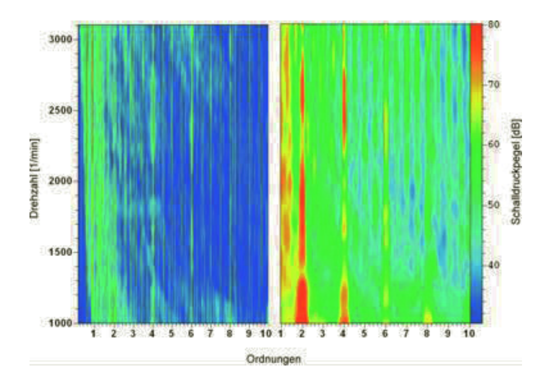


Bild 17-14: Ordnungs-APS aus Ordertracking (links) und aus APS (rechts)

Das Herausschneiden von Ordnungen aus den Zeitdaten von Messungen geschieht mit *Kalman-Filtern*. Diese lassen sich mit schmalbandigen Bandsperr-Filtern vergleichen und werden in ihrer Mittenfrequenz von der jeweiligen Ordnung getriggert. Neben dem Hörvergleich zwischen ursprünglichen und modifizierten Messdaten eignen sich Kalman-Filter auch zur Analyse von Ordnungspegeln. Mithilfe von Kalman-Filtern lassen sich schnelle Pegelveränderungen von Ordnungen wesentlich genauer analysieren als durch das spektrenbasierte Ordertracking. Die Schnelligkeit, mit der Pegeländerungen von Ordnungen verfolgt werden können, lässt sich durch die eingestellte Bandbreite steuern. Bei zu groß gewählter Bandbreite erzeugen Ordnungen, die neben der gewählten Ordnung liegen, einen erkennbaren Anteil in diesem Filter, ohne dass die gewählte Ordnung im Signal enthalten ist. Kalman-Filter reagieren äußerst sensibel auf Signalanteile außerhalb der untersuchten Ordnung, besonders wenn diese nicht dominant ist. Je nach den Eigenschaften der Messdaten muss der Anwender daher abwägen, ob er mittels Ordertracking oder mittels Kalman-Filter bessere Ergebnisse erhält.

17.4.3 Ordnungsfilterung im Motorenbau

Stechen einzelne Töne beispielsweise aus einem Motorgeräusch störend heraus, kann zunächst durch die Darstellung in einem Campbell-Diagramm geprüft werden, ob es sich um Ordnungen handelt. Bei dieser

Darstellung des Schalldruckpegels über der Frequenz und der Drehzahl verlaufen Ordnungen als Ursprungsgeraden. Tonale Geräuschquellen ohne festes Verhältnis zur Motordrehzahl weisen davon abweichende Kurvenverläufe auf. So kann eine erste Abgrenzung infrage kommender Ursachen zwischen Baugruppen erfolgen. Bei einer Motorordnung geschieht die Identifikation der Relevanz einer Ordnung über den Hörvergleich zwischen den Zeitdaten der ursprünglichen Messung und einer gefilterten Version. In dieser wird die im Campbell-Diagramm auffällige Ordnung durch eine schmalbandige Bandsperre mit der Ordnung als Mittenfrequenz herausgefiltert. Ist der tonale Anteil ohne die gefilterte Ordnung nicht mehr zu hören, so bestätigt die Filterung die für den Höreindruck relevante Ordnung.

Eine 24. Ordnung kann beispielsweise von einem Kettenrad verursacht werden, das auf der Kurbelwelle sitzt und 24 Zähne hat. Ebenso kann diese Ordnung von einer Zahnrad-Ölpumpe angeregt werden, die 8 Förderzähne hat und mit dem Faktor 0,75 übersetzt ist. Die hydraulische Grundordnung der Ölpumpe ergibt sich als 6. Motorordnung; die 24. Motorordnung kann dabei als Harmonische herausstechen. In diesem Fall ist beispielsweise ein Kettenrad mit 23 Zähnen auf der Kurbelwelle eine konstruktive Lösung, die unmittelbar die Unterscheidung zwischen Geräuschen der Ölpumpe und des Kettentriebs anhand der Ordnungen erlaubt. So helfen akustisch eindeutige Konstruktionen bei der Vermeidung unnötiger Schleifen im Entwicklungsprozess.

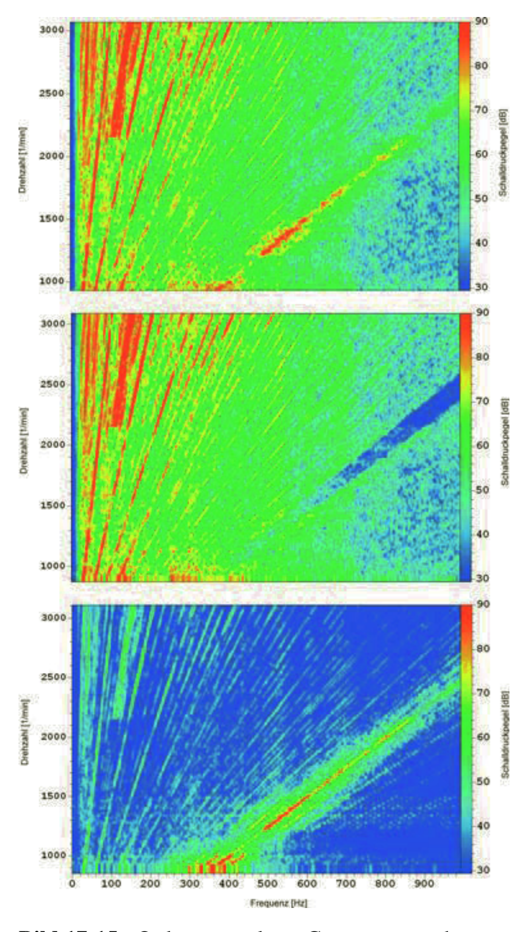


Bild 17-15: Ordnungsanalyse: Gesamtgeräusch (oben), Restgeräusch (Mitte), extrahierte Ordnung (unten)

17.4.4 Grad-Kurbelwinkel-Analyse

Die Grad-Kurbelwinkel-Analyse bezieht sich auf den Winkel der Kurbelwelle bezogen auf den oberen Totpunkt eines Kolbens im Verbrennungsmotor. Prinzipiell erfolgt die Darstellung über Grad-Kurbelwinkel, indem aus den Zeitpunkten der Flanken des Drehzahlsignals bestimmt wird, zu welchen Zeitpunkten Amplitudenwerte des Zeitsignals benötigt werden. Falls eine höhere Auflösung des Grad-Kurbelwinkel-Signals zu berechnen ist als durch die Auflösung des Impulsgebers vorgegeben, werden zusätzliche Zeitpunkte zwischen den Flanken des Drehzahlsignals durch lineare Interpolation bestimmt. Da das Zeitsignal in der Regel nicht genau zu den aus den Drehzahlflanken berechneten Zeitpunkten Abtastwerte besitzt, werden die benötigten Werte für das Grad-Kurbelwinkel-Signal durch Überabtastung des Zeitsignals und anschließende Tiefpassfilterung ermittelt.

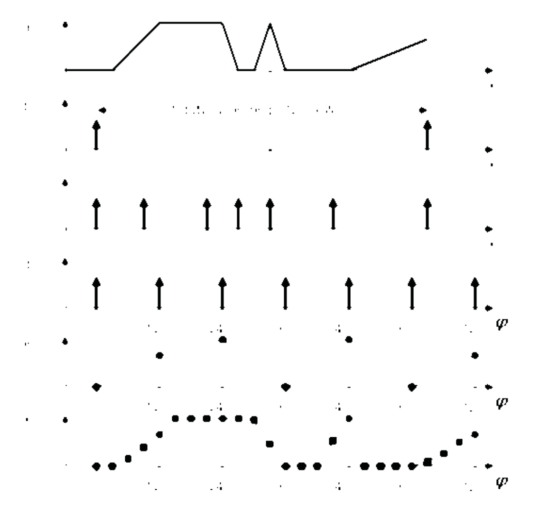


Bild 17-16: Prinzip der Kurbelwinkel-Analyse
a, b, c: Nutzsignal, Drehzahl- und Zünd-OT-Pulse, dargestellt über der Zeit
d: Drehzahl-Pulse über Grad Kurbelwinkel
e: Amplituden des Zeitsignals an den Zeitpunkten der gemessenen Drehzahlpulse (●)
f: Zeitsignal über Grad Kurbelwinkel mit interpolierten Drehzahlpulsen (■)

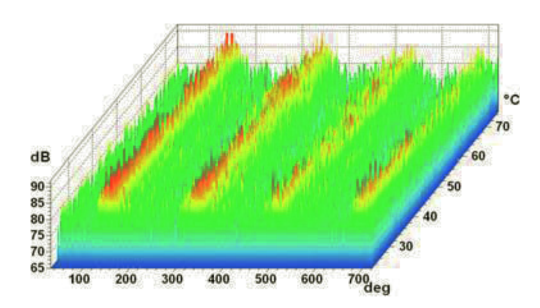


Bild 17-17: Leerlaufgeräusch eines Vierzylindermotors mit Darstellung der Impulshaltigkeit über dem Kurbelwinkel und der Temperatur des Motors. Die charakteristischen Impulse alle 180° Kurbelwinkel sind deutlich zu erkennen.

Neben dem Tachosignal für den meist hoch aufgelösten Drehzahlkanal wird eine Triggerflanke für den Beginn des Arbeitsspiels von 720° benötigt. Durch die Umrechnung von der Zeitskala in Grad-Kurbelwinkel ergeben sich bei der Untersuchung von Verbrennungsmotoren interessante Anwendungsbereiche. Sehen im Zeitsignal auftretende hohe Signalanteile noch stochastisch aus, ist bei der Darstellung über ein Arbeitsspiel u.U. deutlich zu erkennen, dass bei einem bestimmten Winkel eine charakteristische Amplitude auftritt. Durch diese Winkelzuordnung ist auch die Bestimmung der verantwortlichen Komponente besser möglich. Ventilticken oder Kolbenkippen sind Beispiele dafür. Die Varianz des Zylinderdruckverlaufs in Relation zum aufgetretenen Schalldruckpegel lässt Rückschlüsse auf die Geräuschqualität zu [15].

17.4.5 Drehschwingungsanalyse

Drehschwingungen im Triebstrang können unterschiedliche Ursachen besitzen:

- Jeder Verbrennungsvorgang in einem Zylinder beschleunigt die Kurbelwelle, welche die Drehbewegung über Kupplung, Getriebe und Antriebswelle an die Räder weitergibt. Je nach Lastzustand wird dieser Antrieb abgebremst und mit jedem Zündvorgang neu beschleunigt. Dabei entstehen Drehungleichförmigkeiten, die sich mit der Drehschwingungsanalyse quantifizieren lassen.
- Die Steuerkette oder der Zahnriemen wird stirnseitig von der Kurbelwelle angetrieben und treibt wiederum die Nockenwelle, Einspritzpumpe und ggf. den Klimakompressor. Diese Aggregate bringen zu verschiedenen Drehwinkeln unterschiedliche Lasten auf und wirken bremsend. Je nach Steifigkeit und Masse des Antriebs führt dies zu Drehzahländerungen.
- Ketten- oder Zahnradantriebe, zum Beispiel für einen Lanchester-Ausgleich (gegenläufige Ausgleichswellen zweiter Ordnung, Kapitel 9), können höhere Ordnungen anregen, auf die sich Drehungleichförmigkeiten der Kurbelwelle aufmodulieren. Bei einem Antriebsrad mit 40 Zähnen an der Kurbelwelle wird die 40. Ordnung angeregt, an der sich die 2. Ordnung einmal nach oben und einmal nach unten spiegelt. Die Pegel dieser Seitenbänder in Form der 38. und 42. Ordnung hängen von der Motorlast und der damit verbundenen Drehungleichförmigkeit ab.

Bei der Entwicklung von Kettentrieben können sich gegenläufige Interessen zwischen der Primärfunktion und dem Akustikkomfort ergeben. Im bereits genannten Fall eines kettengetriebenen Lanchester-Ausgleichs muss zum Beispiel die Kettenspannung stark genug sein, um trotz der Drehungleichförmigkeit der Kurbelwelle ein Überspringen einzelner Kettenglieder zu verhindern. Allerdings verstärken hohe Spannkräfte von Ketten die Anregung der typischen Verzahnungsordnung, deren Seitenbänder durch die Drehungleichförmigkeit angeregt werden. Wegen der geringen Frequenzabstände treten in diesen Fällen häufig Modulationen auf, die als Rauigkeit empfunden werden. Insofern empfiehlt sich die gleichzeitige Messung der Drehschwingung mit der Motorlast und den Zeitdaten des Luftschalls, die für Audio-Analysen und zum Abhören genutzt werden können.

Um an rotierenden Systemen Torsionsschwingungen zu analysieren, wird der Verlauf der Drehzahl über die Zeit ausgewertet. Zeitliche Schwankungen der Drehzahl werden so sichtbar. Dazu muss für jeden Tachokanal ein Zeitsignal mit der Abtastrate der Zeitrohdaten erzeugt werden. Aus der Zeitdifferenz zwischen zwei Tachopulsen und der Winkelauflösung kann für jeden Abtastwert die momentane Drehzahl und Winkelgeschwindigkeit bestimmt werden. Damit enthalten die Zeitrohdaten den Verlauf der momentanen Drehzahl. Das Zeitsignal stellt die Basis für weitere Analysen dar, zum Beispiel für FFT- und Ordnungsanalysen. Durch ein Hochpassfilter kann der Gleichanteil, der der Grunddrehzahl entspricht, unterdrückt werden: Ein mitlaufendes Tiefpassfilter, dessen Eckfrequenz sich aus der Anzahl der Pulse je Umdrehung ergibt, schützt vor Aliasing-Effekten.

17.4.6 Hauptkomponentenanalyse[1]

Das von einem Insassen wahrgenommene Fahrgeräusch ist grundsätzlich eine Überlagerung verschiedener Beiträge. So hört man beispielsweise neben dem Motor auch einen Anteil, der durch den Fahrtwind erzeugt wird oder durch das Abrollen der Räder auf der Fahrbahn entsteht. Der Akustikentwickler interessiert sich nun zum einen dafür, welche Quelle wie stark zu hören ist, zum anderen, über welche Pfade wie viel übertragen wird. Zur Lösung dieser Aufgabe hat sich die Transferpfadanalyse (TPA) etabliert (Kapitel 16.4).

[1] engl.: Principal Component Analysis (PCA)

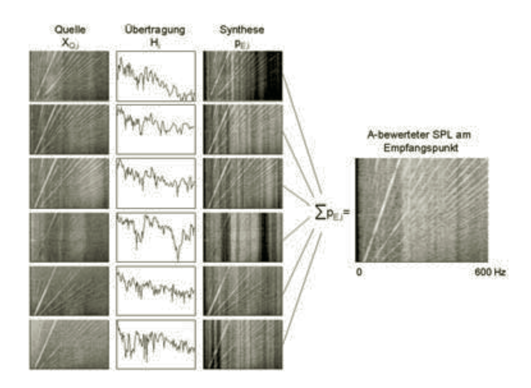


Bild 17-18: Schematische Darstellung der Transferpfadanalyse

Eine weitere Möglichkeit zur Bestimmung des Übertragungsverhaltens bietet die Hauptkomponentenanalyse (PCA) [16] [17]. Die PCA ist eine statistische Methode, die von der Annahme ausgeht, dass der größte Teil der Variation eines Datensatzes durch nur einen kleinen Teil der Variablen, nämlich die Hauptkomponenten, erklärt werden kann (Pareto-Prinzip). Die Grundidee dieser Methode, angewandt auf die obige Aufgabenstellung, besteht darin, über mehrere Beobachtungen der Quell- und Antwortsignale genügend Informationen zu sammeln und daraus statistisch den Zusammenhang, also die Übertragungsfunktionen zwischen den Quellen und der Antwort zu finden. Im Gegensatz zur klassischen TPA werden damit bei der PCA die Übertragungsfunktionen zwischen quellseitigen Signalen und dem Antwortsignal direkt aus einer oder mehreren Betriebsmessungen ermittelt, wodurch sich der Messaufwand deutlich reduziert. Die Analyse besteht dann aus nur einem Schritt, jedoch stehen keine Betriebskräfte explizit zur Verfügung.

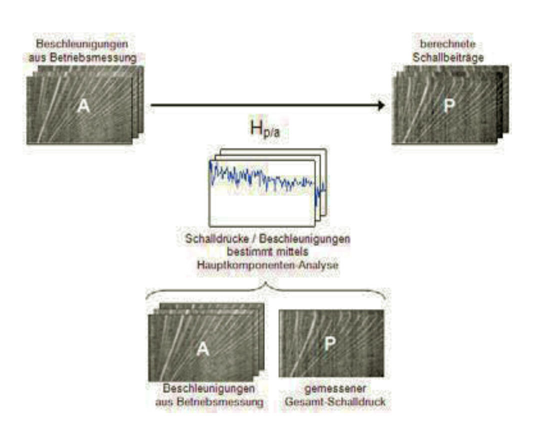


Bild 17-19: PCA der Transferpfade

In der Praxis handelt es sich bei den einzelnen Beobachtungen um eine zeitliche Sequenz von simultanen FFT-Blöcken. Beispielsweise kann vorgegeben werden, dass während eines Hochlaufs alle 50 U/min^{-1} ein kompletter Datensatz abgelegt werden soll. Wichtig ist, dass der Informationsgehalt über diese Messstufen möglichst gut variiert. Zu wenig Information führt zu numerischer Instabilität. Die quellseitigen Signale bilden eine Matrix $[X_{i,j}]$, aus der die Pseudo-Inverse $[X_{i,j}]^+$ gebildet wird. Diese wird mit den Beobachtungsstufen des Antwort-Signals Y_j multipliziert und ergibt einen Satz von Übertragungsfunktionen H_i.

$$\vec{H}_i = \left[X_{i,j} \right]^+ \cdot \vec{Y}_j$$

mit

i: Quellkanal
j: Beobachtungsstufe

Für jeden Quellkanal ergibt sich genau eine Übertragungsfunktion. Da dieses Verfahren ausschließlich auf Beobachtungen der Quell- und Antwortsignale beruht, wird sämtliches Übersprechen zwischen Pfaden in diesen Übertragungsfunktionen implizit mit abgebildet. Zur sauberen Separation der einzelnen Beiträge ist es allerdings erforderlich, sämtliche relevanten Pfade bei der Messung zu erfassen.

In der Analyse interessiert zunächst, welcher Pfad bzw. welche Pfade den größten Beitrag zu einem spezifischen Problem liefern. Hilfreich ist dabei eine Darstellungsform, bei der jeweils im linken Diagramm das Gesamtgeräusch abgebildet ist und rechts die Höhe der verschiedenen Beiträge bezogen auf einen bestimmten Arbeitspunkt oder einen Bereich aus dem linken Diagramm. Auf diese Art lassen sich sehr einfach und schnell ganz unterschiedliche Phänomene analysieren.

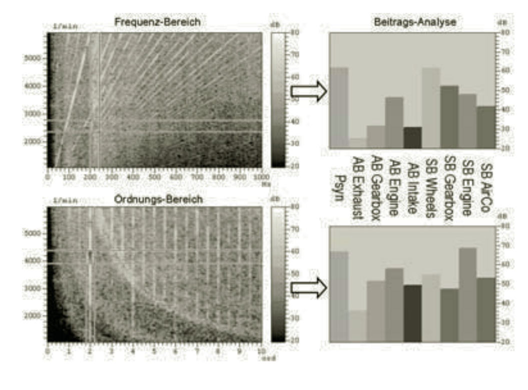


Bild 17-20: Grafische Darstellung der Beitragsanalyse

Letztendlich besteht Interesse daran, herauszufinden, ob der gefundene Problem-Beitrag eher durch eine starke Anregung verursacht wird oder durch eine starke Übertragung oder durch beides. Sichtbar wird

das durch eine Darstellung, wie sie in **Bild 17-18** als Ergebnis einer TPA gezeigt ist.

17.4.7 Mehrdimensionale Ergebnisdarstellung

Vergleichbar zu mathematischen Funktionen können Analysen von gemessenen oder berechneten Größen von mehreren Variablen abhängen. Zur grafischen Darstellung der mehrfachen Abhängigkeiten werden üblicherweise dreidimensionale Diagramme verwendet, zum Beispiel Campbell- und Wasserfall-Diagramme. Dabei spannen die Führungsgrößen die Koordinatenachsen auf. So wird beispielsweise das Betriebskennfeld eines Motors über den Führungsgrößen Drehzahl und Motorlast dargestellt. Moderne Messsysteme erlauben die freie Definition von gemessenen oder berechneten Größen als Führungsgrößen. So lassen sich neben der Drehzahl, der Zeit oder der Motorlast auch der Kurbelwinkel, Temperaturen, Geschwindigkeiten, Auslenkungen, Durchflussmengen usw. als Führungsgröße nutzen. Führungsgrößen können auch ineinander überführt werden. Zum Beispiel lässt sich bei Kenntnis der Übersetzungsverhältnisse aus der Fahrgeschwindigkeit die Motordrehzahl ableiten. Eine Drehzahl kann zur Drehfrequenz umgerechnet werden.

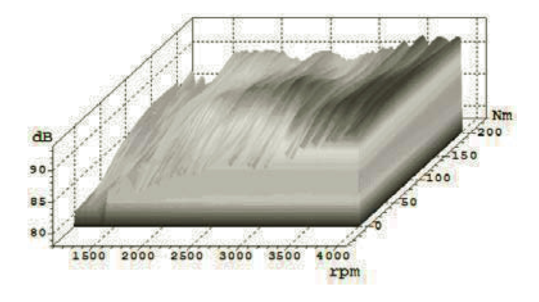


Bild 17-21: Dreidimensionale Darstellung des Schalldruckpegels über Drehzahl und Drehmoment

Bei Akustik- und Schwingungsmessungen an rotierenden Systemen ist von starkem Interesse, bei welchen Drehzahlen bestimmte Ereignisse auftreten und mit welcher Frequenz- und Zeitauflösung diese zu analysieren sind. Mit der Anpassung der Führungsgrößen im Prüflingsbetrieb an die benötigte Auflösung der Analysen lässt sich die Effizienz des gesamten Arbeitsablaufs optimieren.

17.5 Audio-Synthese, Auralisierung

Die Audio-Synthese zur Auralisierung von Geräuschen ist ein wichtiges Werkzeug bei der Entwicklung von Fahrzeugen und unter mehreren Aspekten von Interesse. So dient sie

- der Gestaltung und Festlegung von Ziel-Sounds,
- der Beurteilung von Entwicklungsmaßnahmen auf ihre Wirksamkeit und
- der Umsetzung von Sound-Zielen im Serienfahrzeug.

Das Aufstellen eines konsistenten Zielkataloges zu Beginn jeder Fahrzeugentwicklung erfordert das gegenseitige Abwägen unterschiedlichster funktionaler und ökonomischer Zielsetzungen (Kapitel 2.1.1). Diese Abwägung ist auf der alleinigen Grundlage von technischen Informationen nicht immer in angemessener Weise möglich. Erst die frühzeitige Auralisierung von akustischen Zielen bietet Fachleuten und insbesondere Entscheidungsträgern eine sichere Grundlage für die Bewertung von Alternativszenarien. Dabei kann der Betrachtungsgegenstand sowohl potentielle Stör- und Betätigungsgeräusche, als auch den gewünschten Fahrzeug-Sound umfassen. Zu diesem Zweck ist die Auralisierung von Geräuschen im Sound-Labor mittlerweile etablierte Praxis. Zunehmend wird aber auch von der Möglichkeit Gebrauch gemacht, in speziell präparierten Versuchsträgern mit reduziertem Grundgeräusch unterschiedliche Sound-Szenarien auf elektronischem Weg darzubieten und damit im realen Fahrbetrieb erlebbar zu machen. Nur so kann die gesamthafte subjektive Wirkung aller Sinneseindrücke zur Geltung kommen (Kapitel 2.1.3).

Eine etablierte Methode in der Fahrzeugentwicklung ist die Transferpfadanalyse (TPA). Die TPA lässt sich in zwei Methoden unterteilen. Die erste Methode wird oft als „Klassische TPA“ bezeichnet. Hierbei stehen die Kräfte und deren Reaktionen sowie Wechselwirkungen im Vordergrund. Dieser Ansatz ist für weitere Simulationsberechnungen besonders geeignet. Die hierfür erforderlichen Rahmenbedingungen sind jedoch in der Praxis nicht einfach zu gewährleisten. Aufgrund neuer verfeinerter „Crosstalk Cancelation“-Verfahren und leistungsfähigen weiteren Berechnungsmethoden hat sich die zweite Methode „Operationelle TPA“ in der letzten Zeit stark etabliert. Die wesentliche Einschränkung dieser Methode bezieht sich auf das Fehlen von Kraftbeiträgen (Kapitel 17.4.6). Die Vorteile der zeitgleichen (phasenkorrekten) Erfassung und Bestimmung von Betriebs-Beschleunigungen, Flächenbeiträgen und Schalldrücken hinsichtlich Effizienz und deren Genauigkeit sind jedoch erheblich. Ziel der TPA ist, das beim Empfänger ankommende Gesamtgeräusch nach den verschiedenen Schallquellen und Schallpfaden zu zerlegen (Kapitel 16.4). In umgekehrter Richtung kann mittels der Transferpfadsynthese das Gesamtgeräusch auch aus den einzelnen Schallquellen und Transferpfaden synthetisiert werden. Erfolgt diese Synthese im Zeitbereich, dann kann das Syntheseergebnis unmittelbar hörbar gemacht werden. Konstruktive Modifikationen am Fahrzeug verändern das Übertragungsverhalten bestimmter Transferpfade und damit auch das Gesamtgeräusch. Mithilfe der Kombination von Transferpfadsynthese und Audio-Syn-

these ist es prinzipiell möglich, diese Veränderungen im Modell zu simulieren und das Ergebnis für die Beurteilung hörbar zu machen. Durch Abspielen des ursprünglichen und des modifizierten Geräusches in unmittelbarer zeitlicher Aufeinanderfolge wird es möglich, die Wirksamkeit konstruktiver Maßnahmen im Hörversuch frühzeitig und sicher auch unter psychoakustischen Aspekten zu bewerten (Kapitel 7). Nur wenn sich eine geplante Maßnahme auf diesem Weg als ausreichend nützlich und effizient qualifiziert hat, werden zeit- und kostenaufwändige Komponenten und Prototypen für die endgültige Validierung dargestellt. Die hier skizzierte Methode erfordert nicht unerheblichen messtechnischen und/oder rechnerischen Aufwand für die Bereitstellung der erforderlichen Übertragungsfunktionen zur funktionalen Beschreibung des Fahrzeugs. Dies ist sicher einer der Gründe, warum diese Vorgehensweise in der Fahrzeugentwicklung bisher nur in Einzelfällen angewendet wurde [18]. Bei Modifikationen entfalten sich allerdings die Stärken der Methode. Es genügen nun einfache Komponentenmessungen oder zuverlässige rechnerische Aussagen über die geänderten Komponentenparameter, um deren Auswirkungen auf das Gesamtgeräusch hörbar zu machen. Aufgrund des erheblichen Potenzials der Methode ist damit zu rechnen, dass sie zukünftig vermehrt zur Anwendung kommen wird.

Die Realisierung von gewünschten Ziel-Sounds im Serienfahrzeug ist ein seit langem diskutiertes, aber bisher nur zögerlich umgesetztes Anwendungsfeld für die elektronische Synthese und Auralisierung von Fahrgeräuschen. Die Hemmnisse liegen neben der technischen Komplexität des Themas vor allem in der mangelnden Akzeptanz eines elektronisch erzeugten Motorsounds. Hier ist momentan allerdings ein Umdenken zu beobachten. Dieses hat seine Ursache zum einen in der Verfügbarkeit leistungsfähiger und kostengünstiger Komponenten für die Soundsynthese; zum anderen ist es aber der Tatsache geschuldet, dass der zunehmende Zielkonflikt zwischen Kostendruck, Bauraumzwängen und Leichtbauanforderungen mit konventionellen mechanischen Lösungen nicht mehr ausreichend gut aufgelöst werden kann. Ein gewissermaßen „sanfter" Einstieg in das Thema bietet sich außerdem dadurch an, dass die elektronische Synthese von Fahrgeräuschen sowohl unerwünschte Geräuschanteile mindern, als auch gewünschte Geräusche hervorheben kann. Die Minderung von Störgeräuschen mittels Antischall stößt auf weit weniger Akzeptanzprobleme und wird in ersten Serienfahrzeugen bereits erfolgreich eingesetzt. Der Übergang von der Minderung unerwünschter spektraler Komponenten zur gezielten Gestaltung des gesamten Spektrums ist dann nur noch ein logischer nächster Schritt. Ansätze hierfür gibt es mehrfach. In Kapitel 5.7 ist zum Beispiel das Potenzial der Soundgestaltung im Fahrzeug-Innenraum mittels elektronischer Soundgenerierung über die Audioanlage des Fahrzeugs aufgezeigt. In Kapitel 10 wird das Potenzial der elektronischen Soundsynthese innerhalb der Ladungswechselkomponenten angesprochen. Nachstehend sollen die technischen Prinzipien näher beleuchtet werden, welche der Audio-Synthese für diese Ansätze zugrunde liegen.

17.5.1 Geräusch-Synthese

Ein synthetisches Geräusch kann entweder durch Superposition einzelner Geräusch-Komponenten erzeugt werden oder durch Modifikation eines vorhandenen Geräuschs. Einzelne Geräusch-Komponenten werden beispielsweise im Rahmen einer TPA erzeugt. Eine Kombination von TPA und Audio-Synthese bietet somit eine Grundlage, um den Gesamtklang durch gezielte Modifikationen einzelner Elemente zu verändern und die so erzeugten Varianten zum Beispiel in einem Hörvergleich zu testen. Dadurch lassen sich die akustischen Auswirkungen geplanter konstruktiver Veränderungen simulieren und bewerten, bevor sie tatsächlich umgesetzt werden.

Voraussetzung für die Auralisierung ist, dass auch die TPA im Zeitbereich durchgeführt wird, damit die Einzelbeiträge als Zeitrohdaten vorliegen. Typischerweise wird eine TPA eines aktuellen Fahrzeugs als Basis für die virtuellen Modifikationen durch ein Netzwerk oder Schaltbild dargestellt, wie in **Bild 17-22** gezeigt.

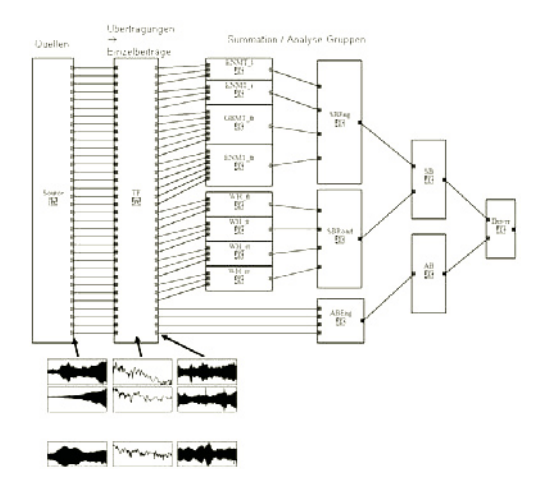


Bild 17-22: Prinzipstruktur eines TPA-Netzwerks

Das Netzwerk beginnt auf der linken Seite mit quellseitigen Zeitsignalen, die einer realen Betriebsmessung entnommen werden. Meist werden Beschleunigungen und Schalldrücke als Quelldaten verwendet. Um aus diesen Quelldaten die antwortseitigen Einzelbeiträge zu berechnen, müssen die jeweiligen Übertragungsfunktionen bekannt sein. Die Zeitsignale der Einzelbeiträge erhält man durch Faltung der

Quellsignale mit den Impulsantworten der Übertragungsfunktionen. In der Praxis werden die spektralen Übertragungsfunktionen durch FIR-Filter nachgebildet.

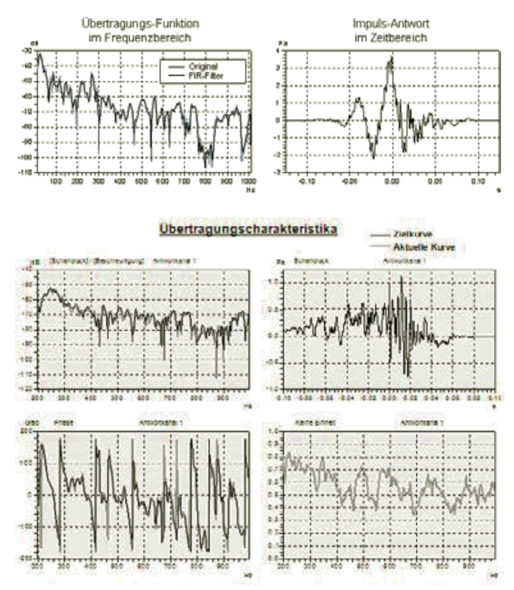


Bild 17-23: Nachbildung der Übertragungsverhaltens der einzelnen Signalpfade durch FIR-Filter

Im rechten Teil des Netzwerks werden die erzeugten Einzelbeiträge aufsummiert, die so den synthetisierten Gesamtschall ergeben. Die Summierung in mehreren Stufen bildet logische oder bauliche Gruppen ab **(Bild 17-22)**.

Ausgehend von diesem Netzwerk, welches das aktuelle Fahrzeug abbildet, können nun bauliche Änderungen simuliert werden [19]. Mögliche Modifikationen sind:

- Änderung von Quelldaten, um geänderte Anregungen zu simulieren,
- Änderung von Übertragungen, um beispielsweise Verstärkungen zu testen,
- Änderung von Einzelbeiträgen, geänderte Dämpfung,
- Einfügen von Berechnungsergebnissen.

Als Beispiel sind unten das Original und zwei Modifikationen als 3D-Spektrum dargestellt.

Ein berechnetes Übertragungsverhalten, das als Element in das Synthese-Netzwerk eingefügt werden soll, entspricht einer gemessenen Übertragungsfunktion und wird im Netzwerk durch FIR-Filter nachgebildet. Solange sich die Übertragungspfade und die anregenden Quelldaten durch die Fahrzeugkonstruk-

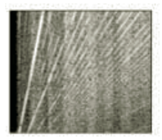
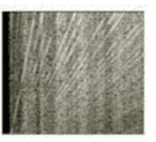
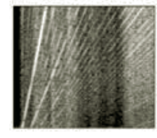
  

Bild 17-24: Beispiel für ein Originalspektrum (links) und zwei synthetisierte Modifikationen (Mitte und rechts)

tion realisieren lassen, hat das Verfahren noch den direkten Bezug zur Re-Synthese von messbaren Ergebnissen. Werden rein synthetische Signale eines Funktionsgenerators zur Anregung genutzt, kann das Verfahren als Vollsynthese bezeichnet und der Ziel-Sound losgelöst von der eigentlichen Fahrzeugkonstruktion gestaltet werden. Elektroantriebe sind im Idealfall sehr geräuscharm, geben aber kaum akustische Rückmeldung auf die Fahrzeugbedienung. Daher zielt die Nachbildung des Geräuschverhaltens eines Verbrennungsmotors auf das gewohnte Fahrerlebnis und wegen der akustisch wahrgenommenen Geschwindigkeit und Beschleunigung auch auf die Fahrsicherheit. Ein vollsynthetisches Antriebsgeräusch kann beispielsweise über die Drehzahl, die Last und die Geschwindigkeit gesteuert werden und in seiner Ausprägung neben Ordnungen und Strömungsrauschen auch Modulationen enthalten, die als Rauigkeit wahrgenommen werden [20] und bei korrekter Dosierung ein angenehmes Klangbild unterstützen. Für die Einkopplung des synthetischen Signals in das Fahrzeug lassen sich vorhandene Lautsprecher oder separate Schallwandler [21] sowie die Aufmodulation auf das Lastsignal des Antriebs nutzen.

Literatur

[1] Binder, S., Zipp, W., DaimlerChrysler AG, Stuttgart. Charakterisierung von Verbrennungsgeräuschen und Strategien zur Optimierung mittels Indizierung, 7. Internationales Symposium für Verbrennungsdiagnostik 2006, AVL Deutschland GmbH

[2] Hobelsberger, J., Rucker, K., Müller-BBM VibroAkustik Systeme GmbH, Planegg. Vortrag „Das ASAM/ODS Transport Format, auch kurz ‚ATF', als firmenübergreifendes Datenformat" bei: DAGA 2006 in Braunschweig

[3] ASAM/ODS Chapter 11, NVH Application Model, ASAM e. V. München

[4] Virnich, B., Müller-BBM VibroAkustik Systeme GmbH, Planegg. Digitale Messdatenerfassung. Fachvortrag Messtechnik, 16. Juni 2003, Fachhochschule Köln

[5] Virnich, B., Müller-BBM VibroAkustik Systeme GmbH, Planegg. Haus der Technik, Fachbuch Band 51 „Motor- und Aggregate-Akustik II", expert verlag 2005; S. 31 ff

[6] Weber, M., Metra Mess- und Frequenztechnik Radebeul. Applikationsschrift, Piezoelektrische Beschleunigungsaufnehmer, AN 1 bis AN 10
[7] Brüel & Kjaer. CD-ROM „Transducers & Conditioning Selection Guide 2004“, Kapitel “Education Material”
[8] Müller, G., Möser, M. (Hrsg.), Taschenbuch der Technischen Akustik, 3. erweiterte und überarbeitete Auflage, Springer-Verlag Berlin 2004, Kapitel 2: Akustische Messtechnik, ISBN 3-540-41242-5
[9] The 93rd Thomas Hawksley Lecture, THE DESIGN AND DEVELOPMENT OF THE ASTON MARTIN DB9 POWERTRAIN, p. 4, Institution of Mechanical Engineers, London
[10] Versuchsanleitungen S3, S6, S7, Fachhochschule Braunschweig-Wolfenbüttel, Fachbereich Elektrotechnik, Labor für Sensorik
[11] de Bree, H.-E., Microflown Technologies/Arnhem School of Automotive Engineering, Tijs, E., Microflown Technologies, Basten, T., TNO Science and Industry. An ultra miniature measurement tool to measure the reflection coefficient of acoustic damping materials in situ. SAE International, 2007.
[12] ISO 1683. Akustik – Bevorzugte Bezugswerte für akustische Pegel in der Akustik und Schwingungstechnik, 2008
[13] Virnich, B., Müller-BBM VibroAkustik Systeme GmbH, Planegg. Haus der Technik Fachbuch Band 25 „Motor- und Aggregate-Akustik I“, expert verlag 2003; S. 146 ff
[14] Webseite von FlexRay™: www.flexray.com
[15] Wartini, Dr. S., Virnich, B., Müller-BBM VibroAkustik Systeme GmbH, Planegg. Vortrag „Crank Angle Analysis“. Automotive Testing Expo, Hamburg, 2000
[16] Lohrmann, M., Hohenberger, Dr. T., Müller-BBM VibroAkustik Systeme GmbH, Planegg. Methodenvergleich zur Ermittlung von Übertragungskoeffizienten: Linear/kraftbasiert und mittels Hauptkomponentenanalyse, Vortrag DAGA 2008
[17] Noumura, K., Yoshida, J., Honda R & D Co. Ltd., Japan. Method of Transfer path analysis for Vehicle interior sound with no excitation experiment, FISITA 2006, F2006D183
[18] Nentwich, F.: Transferpfad-Analyse im Zeitbereich zur Auralisierung von PKW-Innengeräuschen. Aachen: Shaker, 2004
[19] Martner, O., Zerbs, C., Müller-BBM GmbH, Planegg. Übertragungspfadanalyse und -synthese (TPA/TPS) mit Nebenwegkompensation bei Fahrzeugen, Haus der Technik Fachbuch Band 51 „Motor- und Aggregate-Akustik II“, expert verlag 2005
[20] Zerbs, C., Martner, O., Fey, U., Kragl, R., Müller-BBM GmbH, Planegg. Modell zur Berechnung der subjektiven Rauhigkeit von drehzahlabhängigen Geräuschen, Fortschritte der Akustik – DAGA ’01 (Hamburg-Harburg 2001) Bad Honnef: DPG-GmbH, 2001, S. 326-327
[21] Schirmacher, R., Evert, F., Lippold, R., Müller-BBM GmbH, Planegg. Active Noise Control und Active Sound Design für den PKW-Innenraum, DAGA 2005 (München)